

GAIC: Um sistema inteligente e flexível para simulação e apoio à participação de pequenos e médios consumidores na gestão ativa de cargas no âmbito de smart grids

Luís Filipe de Oliveira Gomes

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Informática, Área de Especialização em
Tecnologias do Conhecimento e Decisão**

Orientação: Professora Doutora Zita Vale

Coorientação: Professor Doutor Carlos Ramos

Júri:

Presidente:

Doutora Maria de Fátima Coutinho Rodrigues, DEI/ISEP

Vogais:

Doutor Paulo Jorge Freitas de Oliveira Novais, DI/Universidade do Minho

Doutora Zita Maria Almeida do Vale, DEE/ISEP

Doutor Carlos Fernando da Silva Ramos, DEI/ISEP

Porto, Novembro 2013

Dedicatória

Para todos aqueles que duvidam.

Resumo

A liberalização dos mercados de energia e a utilização intensiva de produção distribuída tem vindo a provocar uma alteração no paradigma de operação das redes de distribuição de energia elétrica. A continuidade da fiabilidade das redes de distribuição no contexto destes novos paradigmas requer alterações estruturais e funcionais. O conceito de *Smart Grid* vem permitir a adaptação das redes de distribuição ao novo contexto.

Numa *Smart Grid* os pequenos e médios consumidores são chamados ao plano ativo das participações. Este processo é conseguido através da aplicação de programas de *demand response* e da existência de *players* agregadores. O uso de programas de *demand response* para alcançar benefícios para a rede encontra-se atualmente a ser estudado no meio científico. Porém, existe a necessidade de estudos que procurem benefícios para os pequenos e médios consumidores. O alcance dos benefícios para os pequenos e médios consumidores não é apenas vantajoso para o consumidor, como também o é para a rede elétrica de distribuição.

A participação, dos pequenos e médios consumidores, em programas de *demand response* acontece significativamente através da redução de consumos energéticos. De modo a evitar os impactos negativos que podem provir dessas reduções, o trabalho aqui proposto faz uso de otimizações que recorrem a técnicas de aprendizagem através da utilização de redes neuronais artificiais.

Para poder efetuar um melhor enquadramento do trabalho com as *Smart Grids*, será desenvolvido um sistema multiagente capaz de simular os principais *players* de uma *Smart Grid*. O foco deste sistema multiagente será o agente responsável pela simulação do pequeno e médio consumidor. Este agente terá não só que replicar um pequeno e médio consumidor, como terá ainda que possibilitar a integração de cargas reais e virtuais. Como meio de interação com o pequeno e médio consumidor, foi desenvolvida no âmbito desta dissertação um sistema móvel.

No final do trabalho obteve-se um sistema multiagente capaz de simular uma *Smart Grid* e a execução de programas de *demand response*, sendo o agente representante do pequeno e médio consumidor capaz de tomar ações e reações de modo a poder responder autonomamente aos programas de *demand response* lançados na rede.

O desenvolvimento do sistema permite: o estudo e análise da integração dos pequenos e médios consumidores nas *Smart Grids* por meio de programas de *demand response*; a comparação entre múltiplos algoritmos de otimização; e a integração de métodos de aprendizagem. De modo a demonstrar e viabilizar as capacidades de todo o sistema, a dissertação inclui casos de estudo para as várias vertentes que podem ser exploradas com o sistema desenvolvido.

Palavras-chave: *Demand Response*, Redes Neuronais Artificiais, Sistemas Multiagente, *Smart Grids*

Abstract

The liberalization of electricity markets and the intensive use of distributed generation have been changing the paradigm of the electrical distribution networks operation. The continuity of distribution networks reliability in the context of these new paradigms requires structural and functional changes. The smart grid context allows the adaptation of the distributed generation to this new context.

In a smart grid, small and medium consumers have to participate. This process is accomplished by the application of demand response programs and by aggregated players. The use of demand response programs to achieve benefits for the network is currently being studied in the scientific field. However, studies that seek for benefits for small and medium consumers are necessary. Reaching the benefits for small and medium consumers is not only advantageous for the consumer, but also for the electrical distribution network.

The participation of small and medium consumers in demand response programs takes place mostly by reducing the energy consumption. In order to avoid negative impacts that may arise from these reductions, the work proposed makes use of optimizations that use learning through the artificial neural networks.

For a better explaining the work with Smart Grids, a multiagent system capable of simulating the main players of a Smart Grid will be developed. The aim of this multiagent system will be the agent responsible for the simulation of the small and medium consumers. This agent must replicate the small and medium consumer, as well as enable the integration of real and virtual loads. As a means of interaction with the small and medium consumer, a mobile system has been developed in the scope of this dissertation.

At the end of this work, it was obtained a multiagent system capable of simulating a smart grid, and the implementation of demand response programs. In this way, the agent responsible for the small and medium consumers capable of taking action and reactions in order to respond autonomously to the demand response programs of the network.

The development of the system allows: the study and analysis of the integration of small and medium consumers in smart grids through demand response programs; comparing multiple optimization algorithms; and the integration of learning methods. For demonstrating and facilitating the capabilities of the whole system, the dissertation comprises case studies for the several ways that can be explored with the developed system.

Keys Words: Demand Response, Artificial Neural Networks, Multiagent Systems, Smart Grids

Agradecimentos

A realização desta dissertação só se demonstrou possível com o apoio e ajuda de algumas pessoas que me apoiaram durante o decorrer de todo o processo. Em especial gostaria de prestar o meu agradecimento pela oportunidade, apoio e orientação provenientes do Professor Carlos Ramos e da Professora Zita Vale.

Todas as pessoas envolvidas ao GECAD também são merecedoras de agradecimento por todo o apoio e trabalho desenvolvido nestes últimos três anos de trabalho. Em especial queria agradecer à Joana Neves, pelo trabalho excecional que faz, e ao Filipe Fernandes pelo trabalho em conjunto no laboratório.

Índice

1	Introdução	17
1.1	Enquadramento	17
1.2	Objetivos do Trabalho	18
1.3	Contributos Principais do Trabalho	20
1.4	Organização do Documento	22
2	Contextualização	23
2.1	<i>Smart Grids</i>	23
2.2	Sistemas Multiagente	28
2.3	Programas de <i>Demand Response</i> e Agregadores	32
2.4	Sistemas SCADA	35
2.5	<i>Demand Side Management</i>	38
2.6	Redes Neurais Artificiais	43
3	Descrição do Sistema GAIC	47
3.1	MASGrIP	47
3.1.1	Arquitetura do Sistema Multiagente	48
3.1.2	Comunicações	51
3.1.3	Agentes Externos	53
3.1.4	MASCEM	53
3.1.5	JADE	54
3.2	Agente Instalação	54
3.2.1	Movicon	54
3.2.2	Simulador em C#	55
3.2.3	Simulador em Java	58
3.2.4	Dispositivos ZigBee	65
3.2.5	Otimizações	67
3.2.6	Interface	69
3.3	Sistema Móvel	70
3.3.1	Funcionalidades	70
3.3.2	Interface	72
3.4	Aprendizagem de Preferências e Previsão de Consumos	73
3.4.1	Configuração das Redes Neurais Artificiais	73
3.4.2	Aprendizagem	74
3.4.3	Previsão de Consumo para o Dia Seguinte	76
4	Casos de Estudo	77
4.1	Dinamismo da Interface Móvel	77
4.2	Otimizações Contextualizadas	78

4.3	Aprendizagem das ANN	81
4.4	Previsão de Consumos	83
4.5	Eventos Excepcionais	84
4.6	RTP	86
4.7	RTDRP	88
4.8	Otimização por <i>Offset</i> vs. Otimização Contínua	91
5	Conclusões	93
5.1	Limitações e Trabalho Futuro	93
5.2	Apreciação Final	94

Lista de Figuras

Figura 1 – a) Esquema dos fluxos de informação e energia nas redes tradicionais b) Esquema dos novos fluxos de informação propostos nas <i>Smart Grids</i> [Farhangi, 2010]	24
Figura 2 – Arquitetura do sistema proposto em [Nagata, 2012a] e [Nagata, 2012b]	30
Figura 3 – Arquitetura do sistema multiagente proposto em [Pipattanasomporn, 2009]	31
Figura 4 – Fluxo geral de informação do programa de RTP	35
Figura 5 – Fluxo geral de informação do programa de RTDRP	35
Figura 6 – Implementação genérica de um sistema SCADA [Queiroz, 2011]	36
Figura 7 – Tipologias de ligação de Sistema SCADA [Kang, 2009]	38
Figura 8 – Resultados obtidos em [Guo, 2008]	42
Figura 9 – <i>Single-layer perceptron</i> ANN	43
Figura 10 – <i>Multi-layer perceptron</i> ANN	44
Figura 11 – Algoritmo simplificado de treino de uma ANN	44
Figura 12 – Funcionamento interno de um neurónio artificial [Bhurtun, 2011]	45
Figura 13 – Esquema da arquitetura do sistema multiagente MASGrIP	48
Figura 14 – Atuação do CSP perante o despoletar de um evento de corte [Gomes, 2014]	50
Figura 15 – Exemplo de comunicações: conexão entre agentes	52
Figura 16 – Laboratório de cargas existentes no GECAD	55
Figura 17 – Arquitetura do simulador implementado em C#	56
Figura 18 – Processos a serem assegurados pelo agente em C#	57
Figura 19 – Arquitetura do simulador em Java	59
Figura 20 – Esquema de classes, em Java, referentes às cargas	63
Figura 21 – Processos a serem assegurados pelo simulador Java	65
Figura 22 – Esquema eletrónico do dispositivo	66
Figura 23 – Núcleo de Otimização	68
Figura 24 – Otimização Instantânea	68
Figura 25 – Otimização por <i>Offset</i>	68
Figura 26 – Otimização Contínua	69
Figura 27 – Simulador Java aplicado, como sistema SCADA, numa instalação	71
Figura 28 – Interface móvel: menu principal	72
Figura 29 – Interface móvel: menu de divisão	73
Figura 30 – Esquematização da ANN usada	74
Figura 31 – Equação (2) aplicada a uma carga com uma preferência inicial de 0,2	76
Figura 32 – Equação (3) aplicada a uma carga com uma preferência inicial de 0,8	76
Figura 33 – Exemplo 1 de uma carga que sofreu alterações consecutivas	76
Figura 34 – Exemplo 2 de uma carga que sofreu alterações consecutivas	76
Figura 35 – Divisão constituída por poucas cargas	77
Figura 36 – Divisão constituída por diversas cargas	78
Figura 37 – Resultados das otimizações segundo o tipo de cargas e a divisões	80
Figura 38 – <i>a)</i> Preços de energia; <i>b)</i> Consumos	87
Figura 39 – Otimização por <i>Offset</i> vs. Otimização Contínua	91

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Consumos de cargas	41
Tabela 2 – Caracterização das otimizações contextualizadas.....	79
Tabela 3 – Cargas da simulação de aprendizagem	81
Tabela 4 – Caracterização do caso de estudo	81
Tabela 5 – Aprendizagem da ANN (Sábado)	82
Tabela 6 – Aprendizagem da ANN (Domingo)	83
Tabela 7 – Previsão de consumos para o dia seguinte	84
Tabela 8 – Preferências do utilizador resultantes.....	85
Tabela 9 – Preferências do evento excecional.....	86
Tabela 10 – Configuração dos <i>Offsets</i> segundo o preço de energia elétrica.....	87
Tabela 11 – Resultados do programa de DR RTDRP	90
Tabela 12 – Discriminação de cargas durante a Otimização Contínua.....	92

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
CSP	<i>Curtailement Service Provider</i>
DLC	<i>Direct Load Control</i>
DR	<i>Demand Response</i>
DSM	<i>Demand-Side Management</i>
ISO	<i>Independent System Operator</i>
MAS	<i>Multi-agent system</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
RTDRP	<i>Real Time Demand Response Program</i>
RTP	<i>Real-Time Pricing</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
VPP	<i>Virtual Power Player</i>

1 Introdução

Neste capítulo inicial é apresentado o enquadramento do trabalho face à atualidade. Apresentam-se ainda a motivação, os objetivos e as contribuições do trabalho realizado.

1.1 Enquadramento

As redes de distribuição de energia elétrica têm vindo a sofrer alterações significativas quer a nível estrutural quer a nível contratual. Isto torna ideal a adoção do conceito de *Smart Grid*, que possibilita soluções para a integração da produção distribuída e de técnicas de gestão de procura, permitindo, assim, reduzir as horas de ponta de procura de energia elétrica e aumentar a fiabilidade da rede de distribuição de energia elétrica [Singhal, 2012].

Tal como acontece em outras áreas, a mudança de metodologias implica a execução exaustiva de testes e análises de impacto e fiabilidade. Desta forma, têm vindo a surgir inúmeros estudos sobre a implementação de *Smart Grids*. No entanto, o estudo da implementação de *Smart Grids* na ótica do consumidor final não tem vindo a merecer muito relevo nos estudos efetuados [Ying, 2012]. Esta dissertação pretende analisar não só a implementação de programas de *demand response* em ambientes de *Smart Grid*, como possui também o papel de analisar os impactos que estes provocam no consumidor, procurando estabelecer metodologias que suavizem os impactos negativos.

A participação ativa dos consumidores, de pequeno e médio consumo, é alcançada com a aplicação de programas adequados de *demand response* [Parvania, 2010]. Programas estes que podem ser baseados no preço ou em incentivos [McAuliffe, 2004] [Yee, 2012]. O uso de programas, juntamente com o conceito de *Smart Grid* e a existência de *players* agregadores de *demand response* permitem que estes consumidores possam participar ativamente na *Smart Grid* [Medina, 2010].

A participação dos pequenos e médios consumidores nas *Smart Grids*, feita através dos programas de *demand response*, concretiza-se significativamente através da redução de consumo instantâneo, ou com alterações de escalonamento no consumo de cargas. Esta

redução instantânea pode significar um desagrado ao consumidor e como tal deve ser analisada de modo a evitar impactos negativos que possam ser causados no dia a dia do consumidor final.

A interação com a *Smart Grid* e a gestão das cargas nas habitações requerem mecanismos autônomos capazes de lidar com inúmeros fatores. A aprendizagem e a adaptação a cenários envolventes são qualidades que devem ser enquadradas na gestão de cargas de pequenos e médios consumidores. Para efetuar a gestão e monitorização de cargas esta dissertação apoiou-se no *Demand Side Management* (DSM). O DSM já se encontra aplicado em casos reais de e tem demonstrado eficácia [Qureshi, 2011].

Na existência da necessidade de aprendizagem, são muitas vezes usadas redes neurais artificiais [Calabrese, 2007]. Estas possibilitam dotar o sistema, que as integra, de capacidade de aprendizagem. Em [Quintero, 2012] existe a integração de redes neurais artificiais num sistema de DSM. O sucesso do uso destas redes para efetuar aprendizagens juntamente com a sua implementação comprovada em DSM fizeram com que a dissertação ruma-se para essa mesma ligação.

O trabalho descrito neste documento tem como objetivo principal o desenvolvimento e implementação de um sistema de simulação de *Smart Grids*, denominado GAIC, de modo a testar e analisar o pequenos e médios consumidores. É ainda objetivo que o GAIC não se limite ao mundo virtual de simulação computacional e que utilize a participação de cargas reais em conjunto com consumidores simulados. A conjugação entre o mundo virtual e o mundo real permite efetuar análises e testes a uma escala realista.

Antes da análise das metodologias existentes propostas para aplicar no pequeno e médio consumidor, foi fundamental desenvolver um sistema multiagente e um simulador capaz de modelar um pequeno ou médio consumidor. O trabalho aqui descrito irá relatar todos os desenvolvimentos efetuados e todas as metodologias inerentes.

Os estudos efetuados são importantes para a aplicação de futuras participações ativas de pequenos e médios consumidores nos ambientes de *Smart Grid*. Tal como será demonstrado, a análise desta integração é essencial para o seu sucesso.

1.2 Objetivos do Trabalho

O trabalho implementado no âmbito desta dissertação tem como objetivo a implementação de sistemas que permitam de uma forma eficaz analisar conceitos referentes às *Smart Grids*, focando essencialmente o pequeno e médio consumidor. Para que tal seja possível, é necessária a implementação de um sistema de simulação capaz de acomodar os conceitos de uma forma realista e viável. Para se obter um sistema validado o trabalho tem os principais objetivos:

- *Estudo de Smart Grids e especificações de cada player* – de modo a adquirir conhecimentos que permitam perceber e replicar as ações da *Smart Grid* e dos seus *players* num ambiente de simulação;
- *Estudo de sistemas multiagente* – de modo a compreender os conceitos e metodologias mais usuais, em específico nos sistemas usados na simulação e representação de *Smart Grids*;
- *Estudo de programas de demand response* – de forma a compreender o seu mecanismo e de modo a detalhar alguns programas que possam ser integrados no trabalho;
- *Estudo de sistemas SCADA* – de modo a possibilitar o desenvolvimento de um sistema SCADA para a gestão e monitorização de um pequeno ou médio consumidor;
- *Estudo de técnicas e métodos de demand side management* – que possibilitem a sua integração num sistema SCADA capaz de gerir adequadamente uma instalação;
- *Estudo do funcionamento de redes neuronais artificiais* – de forma a explorar as metodologias e técnicas usadas, de forma a se poder aplicar este conceito no trabalho a desenvolver;
- *Desenvolvimento de um sistema* – que modele os seus principais *players* de uma *Smart Grid* e que permita a simulação de eventos na *Smart Grid*;
- *Desenvolvimento de um agente instalação elétrica* – este agente tem que ter funcionalidades de simulação, permitindo alcançar um maior número de possibilidades de configuração. Além da simulação, o agente tem que ser capaz de gerir cargas reais por mais do que uma via de comunicação, lidar com eventos provenientes da *Smart Grid* e ainda possuir um funcionamento autónomo fora do sistema multiagente;
- *Desenvolvimento de uma interface móvel* – capaz de lidar com a totalidade das funcionalidades do agente instalação. O sistema móvel tem de ser totalmente dinâmico de forma a acomodar diferentes configurações do agente instalação;
- *Implementação de ferramentas ou aplicações de otimização de consumos na instalação* – de forma a munir o agente instalação de funcionalidades de otimização capazes de reduzir os consumos da instalação sempre que tal for requisitado;
- *Implementação de técnicas de aprendizagem nas otimizações* – para promover o sucesso das otimizações, é essencial dotá-las de inteligência para que estas possam aprender e adequar-se à instalação e aos seus utilizadores;
- *Realização de testes e análises* – este último objetivo testa todas as componentes desenvolvidas e implementadas, tornando os dados conhecidos no meio científico através de publicações de resultados.

Os objetivos estabelecidos foram cumpridos, servindo este documento como relatório final do trabalho elaborado. A execução dos objetivos apenas foi possível após um exaustivo estudo do estado da arte que permitiu ao autor adquirir conhecimentos das áreas a aplicar (capítulo 2). O trabalho foi elaborado ao abrigo do projeto *Cyber-Ambient Intelligent Training of Operators in Power Systems Control Centres* (CITOPSY) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) com a referência PTDC/EEA-EEL/099575/2008.

1.3 Contributos Principais do Trabalho

O paradigma da integração dos pequenos e médios consumidores nas *Smart Grids* tem como base o aumento de recursos disponíveis na rede assim como o aumento de fiabilidade da mesma. A realização desta dissertação produziu contribuições científicas para a integração dos pequenos e médios consumidores nas *Smart Grids*. Como tal, as principais contribuições desta dissertação mereceram a aceitação no meio científico, resultando nas publicações:

- Luis Gomes, Filipe Fernandes, Tiago Sousa, Marco Silva, Hugo Morais, Zita Vale, Carlos Ramos, “Contextual Intelligent Load Management with ANN Adaptive Learning Module”, 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP2011), Crete, Greece, Setembro 25-28, 2011;
- Luis Gomes, Filipe Fernandes, Pedro Faria, Zita Vale, Carlos Ramos, Hugo Morais, “Contextual Intelligent Load Management Considering Real-Time Pricing in a Smart Grid Environment”, ISAP 2013 - 17th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Tóquio, Japão, 01-04 Julho, 2013;
- Hugo Morais, Zita Vale, Tiago Pinto, Luis Gomes, Filipe Fernandes, Pedro Oliveira, Carlos Ramos, “Multi-Agent Based Smart Grid Management and Simulation: Situation Awareness and Learning in a Test Bed with Simulated and Real Installations and Players”, 2013 IEEE PES GM, Vancouver, British Columbia, Canada, 21-25 Julho 2013;
- Pedro Oliveira, Luis Gomes, Tiago Pinto, Pedro Faria, Zita Vale, Hugo Morais, “Load Control Timescales Simulation in a Multi-Agent Smart Grid Platform”, 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (2013 ISGT EU), Copenhaga, Dinamarca, 06-09 Outubro, 2013;
- Luis Gomes, Pedro Faria, Hugo Morais, Zita Vale, Carlos Ramos, “Distributed Agent-based Intelligent System for Demand Response Program Simulation in the Scope of Smart Grids”, IEEE Intelligent Systems, Digital Object Identifier: 10.1109/MIS.2013.2

As publicações mencionadas já obtiveram a aprovação de publicação, contudo existem mais duas publicações, apresentadas em baixo, que apesar de terem sido aceites ainda não se encontram disponíveis:

- Luis Gomes, Marco Silva, Filipe Fernandes, Pedro Domingues, Sérgio Ramos, Zita Vale, “Gestão de Energia Elétrica Residencial Controlada por Dispositivos Eletrónicos via Radiofrequência” que será publicada no 7.º Congresso do Comité Português da URSI - "Um mar sem fronteiras: desafios tecnológicos";
- Luis Gomes, Pedro Faria, Filipe Fernandes, Zita Vale, Carlos Ramos, “Domestic Consumption Simulation and Management Using a Continuous Consumption Management and Optimization Algorithm” que será publicada na IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition 2014.

Para além das publicações mencionadas, esta dissertação contribuiu ainda para o desenvolvimento dos seguintes projetos de investigação:

- *CITOPSY* – Cyber-Ambient Intelligent Training of Operators in Power Systems Control Centres, projeto financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia com a referência PTDC/EEA-EEL/099575/2008;
- *ELECON* – Electricity Consumption Analysis to Promote Energy Efficiency Considering Demand Response and Non-technical Losses, projeto entre a Europa e o Brasil;
- *IMaDER* – *Intelligent Short Term Management of Distributed Energy Resources in a Multi-Player Competitive Environment* (PTDC/SEN-ENR/122174/2010), (FCOMP-01-0124-FEDER-021489).

Como resultado do trabalho obteve-se um simulador de redes de distribuição capaz de simular programas de *demand desponse*. Tal permite desenvolver um sistema multiagente completo, unindo o sistema multiagente, desenvolvido no âmbito desta dissertação, com um sistema multiagente de mercados, já existente, MASCEM.

O agente instalação desenvolvido veio não só completar o sistema multiagente, como também proporcionou outras vertentes positivas como a possibilidade de simular vários tipos de cargas ou ainda de trabalhar como um sistema independente de controlo de um pequeno ou médio consumidor. Outro contributo resultante desta dissertação foi o desenvolvimento de um dispositivo eletrónico capaz de controlar cargas físicas via *wireless*.

Como resultado do trabalho foi possível dotar a instalação elétrica com competências de inteligência, através da aplicação de técnicas de inteligência artificial, provando o seu valor e mais valia nesta área. As metodologias propostas e aplicadas para dotar o GAIC de aprendizagem contribuem para a implementação de futuros sistemas e para a integração dos pequenos e médios consumidores nos ambientes de *Smart Grid*.

Os testes e análises efetuadas ao GAIC comprovaram a sua eficiência e aplicabilidade em ambientes reais. Os resultados destes testes foram publicados ou encontram-se à espera da aceitação para publicação. A divulgação de resultados pretende contribuir, no meio científico, para futuros sistemas de simulação de *Smart Grids* e para a integração dos pequenos e médios consumidores nesse ambiente.

O GAIC que resulta conclusão desta dissertação permite a integração de cargas reais para executar testes de impacto em pequenos e médios consumidores que participem em programas de *demand response*. A integração de cargas reais, juntamente com cargas virtuais, colocou o atual sistema em vantagem aos sistemas equivalentes de simulação e permite à instituição de acolhimento executar testes e análises realistas de forma a proceder a estudos de impacto nos pequenos e médios consumidores.

1.4 Organização do Documento

O atual documento encontra-se subdividido em cinco capítulos principais. Após a introdução feita neste presente capítulo 1, serão abordados os principais conceitos teóricos referentes ao trabalho. O capítulo 2 descreve os conceitos teóricos usados, aborda o respetivo estado da arte e refere a razão da sua aplicação neste trabalho.

O capítulo 3 detalha os aspetos técnico-científicos do trabalho. Este capítulo encontra-se subdividido em quatro secções, correspondendo às implementações mais relevantes para o trabalho. Aqui, serão minuciosamente descritas todas as decisões adotadas para o desenvolvimento e implementação do trabalho.

O capítulo 4 apresenta alguns casos de estudo que foram produzidos para viabilizar o sistema GAIC desenvolvido nesta dissertação, a sua escolha derivou da importância e diversificação de funcionalidades que cada um trata. O capítulo 5 termina o documento com as principais conclusões obtidas durante o decorrer da dissertação e sugere perspectivas futuras para continuação do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação.

2 Contextualização

Neste capítulo serão abordados os temas teóricos mais relevantes para o trabalho. Cada secção apresenta um conceito teórico aplicado durante a elaboração da dissertação. Após a explicação dos conceitos, será abordada a sua aplicação no capítulo 3.

2.1 *Smart Grids*

O uso geral dos sistemas energéticos atuais prende-se pelo transporte de energia entre as centrais de produção e os consumidores finais [Fang, 2012]. Este sistema perdura há anos e estimula o consumo pouco criterioso dos consumidores que pagam um preço fixo por kWh, independentemente do custo real de produção na hora de consumo.

A existência de horas de grande consumo de energia provocam, no sistema atual, uma ineficiência do sistema, obrigando os produtores a possuir meios para satisfazer a procura de energia elétrica nessas horas de ponta. Tipicamente, 20% da capacidade de produção apenas existe para satisfazer as horas de grande procura de energia elétrica, sendo que estas apenas representam 5% do horário diário [Moshari, 2010]. Enquanto o consumidor continuar a pagar um preço fixo por kWh, dificilmente serão alterados os seus hábitos de consumo de forma a evitarem-se horas de elevada procura de energia elétrica [Moshari, 2010].

Apesar das horas de elevada procura de energia elétrica terem sido sempre um contratempo para os produtores e sistemas de distribuição, outro aspeto mais recente veio provocar uma revolução na forma como o sistema estava idealizado. A introdução de sistemas de produção distribuída de baixa potência veio permitir aos consumidores injetarem energia na rede, aumentando, assim, a dificuldade de gestão por parte dos sistemas tradicionais de distribuição de energia elétrica [Chen, 2012].

Por outro lado, uma das maiores preocupações atuais a nível mundial prende-se com o aumento da eficiência energética e com a diminuição de emissões de gases com efeito de estufa como o Co₂ [Panajotovic, 2011]. Por estas razões, de forma a desenvolver e implementar um

sistema de distribuição de energia elétrica adequado aos desafios e exigências dos nossos dias, foi introduzido o conceito de *Smart Grid*.

Uma *Smart Grid* é uma rede de energia elétrica inteligente capaz de reduzir as horas de grande procura de energia elétrica e maximizar o uso de produção distribuída, aumentando, desta forma, a eficiência das redes de distribuição [Yonghua, 2011]. A *Smart Grid* liga os produtores e consumidores numa rede que fomenta a comunicação bilateral em vez das comunicações unilaterais usadas nas redes atuais [Ye, 2013]. A integração de comunicações bilaterais vem incorporar os benefícios das tecnologias de comunicação em tempo-real nas redes de distribuição, permitindo assim garantir de forma eficiente o equilíbrio em tempo-real entre produção e consumo melhorando o desempenho da rede [Ye, 2013]. A Figura 1 apresenta as distinções entre as comunicações que perduram nas redes de distribuição atuais e as comunicações nas *Smart Grids*. As redes tradicionais que atualmente perduram possuem fluxos de energia e informação unilaterais (Figura 1.a – analisar a figura acima do tracejado), já o conceito de *Smart Grid* utiliza fluxos bilaterais (Figura 1.a e 1.b – analisar a figura por completo).

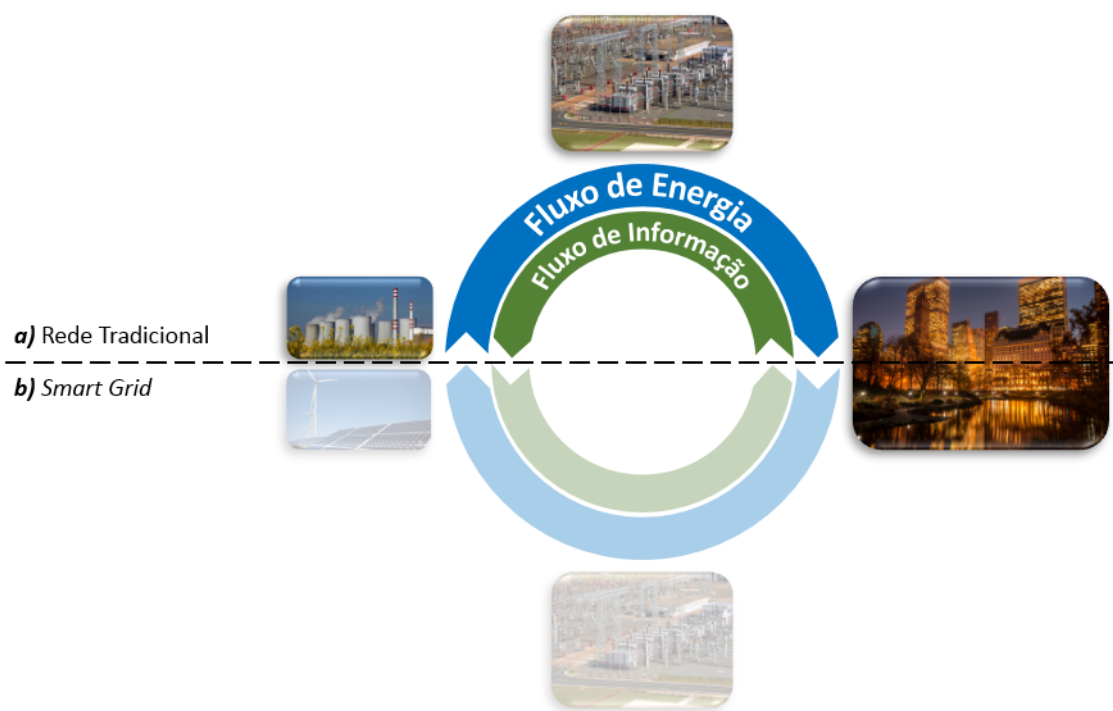


Figura 1 – **a)** Esquema dos fluxos de informação e energia nas redes tradicionais **b)** Esquema dos novos fluxos de informação propostos nas *Smart Grids* [Farhangi, 2010]

As *Smart Grids* foram idealizadas tendo em conta questões de segurança por parte do consumidor e da rede, questões de fiabilidade e estabilidade e questões de custo, de forma a minimizar os preços de energia para o consumidor final [Clastres, 2011].

Os benefícios proporcionados pelas *Smart Grids* colocaram-nas na agenda política de diversos países [Brandstatt, 2012]. A Agência Internacional de Energia concluiu recentemente que as *Smart Grids* “coordenam as necessidades e capacidades de todos os geradores, operadores de

rede, utilizadores finais e operadores de mercados de energia para acionar o mais eficientemente possível todas as partes do sistema, minimizando os custos e o impacto ambiental enquanto maximizam a confiança, resiliência e a estabilidade do sistema” [International Energy Agency, 2011].

Com a introdução da gestão da procura de energia elétrica, produção, preço em tempo-real e contadores automáticos, as *Smart Grids* aumentam a conectividade, automação e coordenação entre produtores, consumidores e a rede [Singhal, 2012]. Com o apoio das comunicações bilaterais, o consumo dos consumidores pode ser consultado em tempo-real, o que permite a cobrança segundo o valor de produção de energia, abandonando, assim, o conceito atual onde um consumidor que consome apenas nas horas de maior custo de produção pague o mesmo que um consumidor que consuma o mesmo mas em horas de produção mais baratas [Farhangi, 2010].

A introdução de *Smart Grids* vem permitir a implementação de redes de distribuição mais inteligentes e completas, onde os consumidores abandonam o seu comportamento passivo para assumir um papel ativo [Farhangi, 2010]. A automação e a comunicação bilateral à distância permitem às *Smart Grids* restabelecerem-se sozinhas após a ocorrência de falhas [Oualmakran, 2012].

A implementação de uma *Smart Grid* não pode ser efetuada apenas de cima para baixo, i.e., todos os intervenientes têm que sofrer alterações, inclusive os consumidores [Stragier, 2010]. A implementação integral a um país requer alterações a larga escala desde o mercado de energia, aos produtores, à rede e aos consumidores [Panajotovic, 2011].

Apesar das mudanças significativas nos métodos de gestão de recursos, as *Smart Grids* necessitam de uma rede de sensores, contadores e atuadores para que os intervenientes da rede (mercado de energia, rede, produtores e consumidores) sejam capazes de obter informação e executar ações em tempo real [Aalamifar, 2012]. Na gestão de recursos as *Smart Grids* têm que se adaptar a novos desafios como a introdução de carros elétricos, a gestão da energia produzida pelos consumidores a partir de energias primárias renováveis, a integração de *microgrids* e a aplicação de programas de *demand response* [Yonghua, 2011].

A nível do consumidor final (o foco desta dissertação) as alterações significativas provocadas pela integração numa *Smart Grid* provêm da participação ativa nos programas de *demand response* (apresentação na secção 2.3 deste documento) e na gestão dos seus recursos de maneira a tornar o seu consumo e/ou produção mais eficientes. Tornando os preços de energia mais voláteis, as *Smart Grids* permitem que o consumidor possa controlar de uma forma inteligente o seu consumo, reduzindo, assim, os custos energéticos e aumentando a confiança, eficiência e transparência na rede [Ye, 2013]. A alteração de hábitos de consumo permite uma melhor relação entre a produção e o consumo e poderá levar à redução das horas de ponta de procura de energia elétrica onde se verifica a maior ineficiência da rede atual. Esta alteração pode ser alcançada com o recurso a incentivos fiscais para os consumidores [Yonghua, 2011].

A implementação de *Smart Grids* não se limitará a alterar aspetos técnicos da rede, sendo que os papéis de alguns intervenientes da rede terão que sofrer alterações profundas, terão que aparecer novos intervenientes [Brandstatt, 2012]. As mudanças propostas pelas *Smart Grids* envolvem a reestruturação completa do sistema de distribuição de energia elétrica atual. Contudo, a sua implementação possibilita um sistema mais completo e melhor preparado para os dias atuais e futuros. De seguida são apresentados quatro países onde a implementação de *Smart Grids* já começa a ser planeada.

Reino Unido

A parceria conjunta entre o Gabinete de Mercados de Gás e Energia Elétrica (Ofgem¹) e o Departamento de Energia e Alterações Climáticas (DECC²) tornou possível a criação de uma fórum de discussão intitulado Grupo Estratégico de Redes de Energia Elétrica (ENSG³), de onde resultou um mapa para a implementação de *Smart Grids* e a iniciativa de até 2020 disseminar por completo os contadores inteligentes. Outra parceria conjunta entre a Ofgem e a DECC produziu a iniciativa “*Smart Grid Implementation Programme*”. Este programa defende a coordenação simultânea entre a implementação de *Smart Grids* e a disseminação dos contadores inteligentes, apesar de distinguir as duas vertentes [Brandstatt, 2012].

Segundo a DECC, a responsabilidade da disseminação dos contadores inteligentes ficará a cargo dos fornecedores de energia, enquanto que o controlo do fluxo de informação e garantias de privacidade será responsabilidade de uma nova entidade intitulada Companhia de Informações e Dados (DCC⁴), que recuperará os custos cobrando taxas de serviço aos consumidores. Estes terão o controlo de informação a ser divulgada por esta nova entidade [Brandstatt, 2012].

Dinamarca

A produção distribuída existente na Dinamarca torna este país propício para a implementação e teste de novos conceitos de redes de distribuição. A existente descentralização do controlo e a subdivisão dos sistemas energéticos em ilhas favorece a integração de novos conceitos no âmbito da produção distribuída. A visão por trás da descentralização e criação de ilhas, prende-se com a intenção do país pretender criar um sistema inteligente multiagente que seja capaz de restabelecer autonomamente a rede de energia elétrica no caso da existência de falhas [Brandstatt, 2012].

O objetivo é deixar de usar o conceito de “produção impulsionada pelo consumo” para usar o conceito de “consumo impulsionado pela produção” [Vestervang, 2011]. No mercado de energia elétrica, os consumidores são tidos como grupos a quem são fornecidos os serviços da rede. Apesar destas iniciativas, a Dinamarca não possui metas elaboradas referentes a contadores inteligentes [Brandstatt, 2012].

¹ Office of Gas and Electricity Markets

² Department of Energy and Climate Change

³ Electricity Networks Strategy Group

⁴ Data and Communications Company

França

Em 2010, A Comissão Reguladora de Energia (CRE⁵) declarou que a rede de distribuição francesa não se encontrava ao nível das redes europeias, anunciando as *Smart Grids* como o caminho a seguir. Com isto, foi aberto um debate público onde vários intervenientes participaram, incluindo empresas de telecomunicações [Brandstatt, 2012].

A Rede de Distribuição de Energia Elétrica Francesa (ERDF⁶), juntamente com apoios governamentais, desenvolveu e testou contadores inteligentes que visam fornecer informações aos consumidores, controlar a procura de energia elétrica, limitar os custos e melhorar a qualidade do fornecimento. A instalação e disseminação entre os 35 milhões de consumidores franceses ficou a cargo dos operadores dos sistemas de distribuição. A instalação global dos contadores perante os consumidores é tratada como sendo a primeira etapa para a implementação de *Smart Grids* em França. Outras iniciativas já foram divulgadas, como o interesse da União Francesa de Eletricidade em criar regulamentação contratual para ser possível a agregação de consumidores. Contudo, ainda não é claro de quem ficará a cargo função de agregação [Brandstatt, 2012].

Estados Unidos

Nos Estados Unidos da América, o objetivo político de desenvolver as *Smart Grids* nos sistemas de distribuição de energia elétrica foi anunciado em 2007. Em 2011 já existiam 8 estados com planos de introduzir contadores inteligentes e outros 12 estados onde tinham sido adotadas medidas para implementar preços dinâmicos de eletricidade a serem aplicados ao consumidor. A alteração de um sistema centralizado controlado pela produção para um sistema menos centralizado que interaja com o consumidor significou uma mudança dos papéis assumidos pelos intervenientes no sistema de energia elétrica [Brandstatt, 2012].

Nos novos modelos de mercado pretende-se que todos os intervenientes da rede de energia interajam com o mercado de energia elétrica. Contudo, os pequenos consumidores deverão recorrer a agregadores de forma a adquirirem uma maior dimensão a nível de mercado. A nível grossista os novos mercados encontram-se a funcionar de modo satisfatório. A nível do retalho ainda se estão a desenvolver mercados que se adequem ao panorama do país, podendo vir a surgir novos mercados [Brandstatt, 2012].

Como é possível constatar pelos casos relatados, o conceito de *Smart Grid* não tem vindo a ser aplicado de uma forma homogénea a nível global. Cada país tem definido o que acha mais correto. No entanto, alguns conceitos encontram-se quase generalizados devido à sua necessidade de implementação, como é o caso da alteração das comunicações nas redes de distribuição atuais. A maioria dos países tem-se focado nos contadores inteligentes para prosseguir para a implementação integral das *Smart Grids*.

⁵ Commission de Régulation de l'Energie

⁶ Electricité Réseau Distribution de France

Esta dissertação tem como base a integração de pequenos e médios consumidores nas *Smart Grids* através da aplicação de programas de *demand response*. Como tal, durante a execução do trabalho foi desenvolvido um sistema multiagente de simulação de *Smart Grids*. Permitindo a execução de programas de *demand response* num ambiente de *Smart Grid*. O desenvolvimento e implementação de tal sistema exigiu o estudo prévio, aqui apresentado, no âmbito das *Smart Grids*.

2.2 Sistemas Multiagente

Os sistemas multiagente (MAS⁷) são um campo de estudo da Inteligência Artificial Distribuída [Ozcan, 2011]. Este tipo de sistema não se limita a uma única máquina nem a um único programa informático. Ao atribuir autonomia a cada sistema individual, denominado agente, é possível incrementar a complexidade e número de agentes no sistema, sem daí resultarem alterações estruturais aos restantes agentes.

O conceito geral de um sistema multiagente prende-se com a criação de múltiplos agentes autónomos que interagem entre si para satisfazer um objetivo comum, apesar de no sistema cada agente poder ter objetivos individuais que tentará alcançar [Balaji, 2010]. Este tipo de sistemas possui duas vertentes de execução: o sistema pode fazer uso dos agentes de modo a que estes cooperem entre si para tentarem alcançar os seus objetivos, e por fim produzir uma solução para o objetivo global do sistema; por outro lado, o sistema pode usar os agentes em modo competitivo, onde estes competem entre si para produzirem os objetivos individuais [Balaji, 2010]. A existência de agentes cooperativos não invalida a existência de agentes competitivos, o mesmo sistema multiagente poderá conter agentes que cooperem entre si e ao mesmo tempo compitam com outros.

A subdivisão que os sistemas multiagentes proporcionam permite criar sistemas complexos em que cada agente é responsável por uma tarefa específica [Khamphanchai, 2011]. Outra possibilidade inclui a integração de sistemas externos que inicialmente não estavam pensados para serem integrados. Isto é possível devido à autonomia que cada agente possui a nível de funcionamento e comunicação.

O conceito de *Smart Grid* reforça a descentralização dos sistemas de energia elétricos, transformando todo o sistema existente num sistema mais complexo, onde não se torna eficaz a existência de uma única unidade centralizada de controlo [Kouluri, 2011] [Hernandez, 2013]. A existência de uma única unidade centralizada de controlo apenas iria dificultar toda a implementação e gestão do sistema [Khamphanchai, 2011]. O uso de um sistema multiagente permite descentralizar este controlo e repartir funções entre agentes, dividindo o processamento dos dados. Os MAS ainda permitem a existência de agentes externos como medidores ou atuadores de *hardware*, capazes de integrar o sistema, e completa-lo sem aumentar consideravelmente a sua complexidade de execução [Khamphanchai, 2011]. Isto só

⁷ Multi-Agent System

se torna possível devido à autonomia, sociabilidade, reatividade e pro-reatividade inerentes nos agentes [14.2].

A coordenação dos agentes proporciona ao sistema a capacidade de os utilizar como meio para alcançar um objetivo em tempo real [Xianyong, 2012]. Outra vantagem dos sistemas multiagente é a capacidade de lidar com falhas de agentes. Isto deve-se ao facto de o sistema não ser centralizado, o que permite que agentes substituam outros agentes similares, permitindo, assim, a continuidade de execução do sistema [Yinliang, 2011].

Os agentes tomam as suas próprias decisões para poderem atingir os objetivos que desejam, fazendo uso da respetiva inteligência [Manickavasagam, 2011]. Em termos de comunicações, os agentes podem comunicar e funcionar em modo síncrono ou assíncrono entre si, dependendo da comunicação e do respetivo objetivo [Khamphanchai, 2011].

Os MAS têm vindo a ser usados nos sistemas de energia de modo a poder contornar problemas que se demonstrem ser um desafio para as técnicas tradicionais de computação. Dentro do campo de energia elétrica, os MAS têm vindo a demonstrar a sua utilidade no desempenho, na reposição da rede elétrica, no controlo de tensão secundária dos sistemas elétricos e na visualização de sistemas de energia elétrica [Pipattanasomporn, 2009].

A seguir serão descritos alguns MAS estudados que se enquadram no âmbito das *Smart Grids*. O estudo destes sistemas contribuiu para o desenvolvimento do MAS implementado neste trabalho que tem como objetivo a simulação de uma *Smart Grid* de forma a possibilitar a realização de testes e análises de programas de *demand response* que integrem pequenos e médios consumidores na *Smart Grid* (secção 3.1).

Multi-agent Smart Grid Management System

Este sistema multiagente foi apresentado em [Nagata, 2012a] e [Nagata, 2012b] e tem como objetivo principal a simulação de uma *Smart Grid* ao nível de compra e venda de energia. O sistema lida com previsões de consumo e produção, para que depois seja possível simular o mercado de energia. Tal como o sistema usado no trabalho descrito neste documento, este sistema usa um MAS para poder simular o funcionamento da *Smart Grid*.

A Figura 2 ilustra a arquitetura do sistema proposto em [Nagata, 2012a] e [Nagata, 2012b], onde é visível a existência de três níveis hierárquicos. No nível mais elevado encontra-se o Agente da Rede (GridAG). O GridAG possui duas responsabilidades distintas, tendo a responsabilidade de comprar e vender energia ao Agente de Controlo da *Smart Grid* (SGC), a aquisição e fornecimento de energia não possui limites no sistema usado [Nagata, 2012a]. No segundo nível hierárquico mais elevado encontra-se o SGC. Este agente é responsável pelo controlo do sistema, cabendo-lhe iniciar e lidar com as negociações existentes. No nível hierárquico inferior encontram-se os Agentes Produtores (GAG), os Agentes Vendedores (SAG), os Agentes Consumidores (LAG) e os Agentes Compradores (BAG). Estes agentes representam os *players* da rede de energia responsáveis pela produção e pelo consumo e pela venda e compra de energia. O GAG representa um *player* de produção e o LAG representa um consumidor.

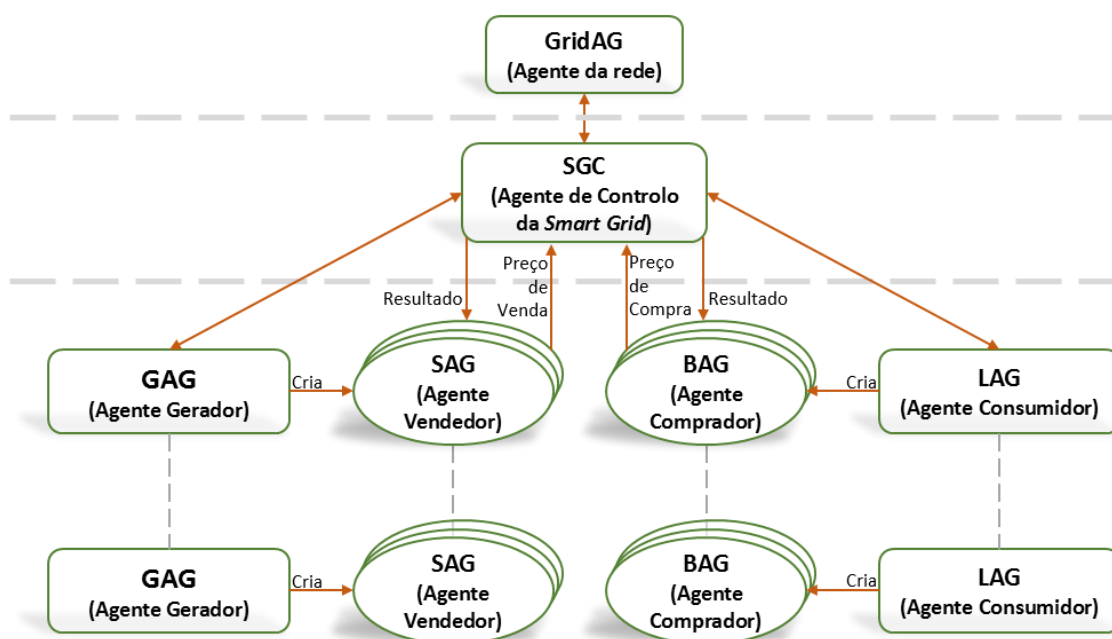


Figura 2 – Arquitetura do sistema proposto em [Nagata, 2012a] e [Nagata, 2012b]

Na inicialização do sistema, cada GAG e cada LAG efetuam uma previsão de produção e consumo respetivamente. Esta previsão é efetuada tendo em atenção o histórico de produção ou consumo nesse agente, mais a previsão meteorológica que se irá sentir na data para a qual se está a prever [Nagata, 2012b]. Após cada agente possuir a sua previsão, são criados os SAG e os BAG, que são agentes que representam os GAG e os LAG que os criaram. Um GAG pode possuir mais do que um SAG, sendo, deste modo, possível vender diferentes parcelas de energia com diferentes condições. De forma similar ao GAG, o LAG também pode por si criar diversos BAG. De seguida, cabe ao SGC definir as ligações entre os vendedores e os compradores, tendo ainda, caso necessário, de comprar ou vender energia ao GridAG.

Intelligent Distributed Autonomous Power Systems Multi-agent System

Em [Pipattanasomporn, 2009] é apresentado um MAS capaz de simular uma *microgrid*. Este sistema tem como função a execução de cenários numa *microgrid*, onde o objetivo global do sistema é satisfazer cargas críticas em momentos de falha. Para tal, utiliza uma estrutura de agentes para representar apenas a *microgrid*, deixando de fora todos os outros intervenientes da rede de distribuição de energia elétrica.

Na Figura 3 é apresentado o sistema de agentes desenvolvido em [Pipattanasomporn, 2009]. Apesar da simplicidade inerente a esquema, há que realçar que o sistema apenas diz respeito ao controlo de uma *microgrid*. Nele não são contemplados os agentes representativos dos consumidores nem produtores nem nenhum *player* que não integre diretamente a *microgrid*.

O Agente Controlador da Figura 3 possui a responsabilidade de monitorizar a tensão e a frequência da rede elétrica de modo a detetar falhas, isolando a *microgrid* sempre que existam falhas na rede. Este agente é ainda responsável por obter informação proveniente da rede, tal

como o preço de energia por quilowatt-hora (€/kWh). O Agente de Recursos é responsável por armazenar toda a informação proveniente dos geradores, podendo ainda monitorizá-los e controlá-los. O Agente Utilizador possui os meios que possibilitam aos utilizadores do sistema visualizar informação do MAS. Os dados relativos aos consumos de cargas também podem ser visualizados neste agente. O Agente Base de Dados tem a responsabilidade de armazenar toda a informação do sistema, incluindo as comunicações que nele se desenrolam.



Figura 3 – Arquitetura do sistema multiagente proposto em [Pipattanasomporn, 2009]

O sistema descrito em [Pipattanasomporn, 2009] foi implementado na plataforma Zeus. Esta plataforma foi escolhida devido à facilidade de uso e ao facto de respeitar as normas da Fundação de Agentes Físicos Inteligentes (FIPA⁸) associada ao Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos (IEEE⁹). Aquando da criação do MAS, a plataforma Zeus adiciona automaticamente mais três agentes:

- *Name Server* – todos os agentes do sistema têm de se dar a conhecer a este agente; nele são armazenados os nomes e endereços de cada agente, servindo de páginas brancas do sistema;
- *Facilitator* – também aqui os agentes terão de se conectar para identificar os seus serviços; nele são armazenados todas as funções de cada agente, servindo de páginas amarelas do sistema;

⁸ Foundation of Intelligent Physical Agents

⁹ Institute of Electrical and Electronics Engineers

- *Visualizer* – Este agente permite ao administrador do sistema visualizar todo o sistema multiagente, servindo como uma interface geral para monitorização do MAS.

De forma a obter uma simulação mais aproximada do real, os autores optaram por interligar o MAS a um programa desenvolvido em MATLAB/Simulink, que simula em tempo real e com precisão uma rede elétrica. A comunicação entre os agentes e o programa desenvolvido em MATLAB/Simulink é efetuada através de conexões de TCP/IP, permitindo, assim, que ambas as partes possam ser executadas em máquinas diferentes.

O trabalho descrito neste documento apoia-se no conceito de MAS de maneira a implementar um sistema capaz de simular *Smart Grids*, e os principais *players* que dela fazem parte. Este simulador é essencial para se poder elaborar um estudo exaustivo aos consumidores de pequeno e médio porte e ao impacto que estes sofrem devido aos programas de *demand response*.

2.3 Programas de *Demand Response* e Agregadores

A existência de diversos recursos de produção de energia elétrica, e de horas de elevada procura de energia elétrica que ocorrem diariamente, provocam uma variação de preço de produção de energia. Apesar do custo de produção ser variável, o preço pago pelos consumos é na sua maioria por um preço estático que não reflete as variações do custo de produção ao longo do dia [Faruqui, 2002]. Para evitar *blackouts* os níveis de produção e consumo têm que se encontrar constantemente em equilíbrio, como tal, um aumento de consumo obriga a um aumento de produção e subsequente aumento de preço de energia devido ao aumento de procura [Madaeni, 2013].

A solução atual para proporcionar o equilíbrio necessário é munir as redes de equipamentos de produção capazes de serem ativados para satisfazer a procura de energia elétrica [Nunna, 2012]. Porém, uma outra solução tem vindo a ganhar força na literatura, e diz respeito à alteração dos perfis de consumo de maneira a que os consumidores reajustem o seu consumo para horas fora daquelas que correspondem às horas de maior procura de energia elétrica [Vale, 2013]. Este processo é possível através da introdução de programas de *Demand Response* (DR). Apesar dos estudos referentes à DR, no impacto que esta cria nas *Smart Grids*, poucos estudos têm sido direcionados para os consumidores [Ying, 2012]. A falta de estudos relativos aos impactos nos pequenos e médios consumidores esteve na origem do surgimento desta dissertação, onde este estudo é uma dos focos principais.

Os programas de DR foram idealizados para promover a harmonia entre a procura e a produção de energia elétrica [Faria, 2014] [Rahimiand, 2010]. Estes programas permitem oferecer incentivos aos consumidores de modo a estes alterarem os seus hábitos de consumo, permitindo, assim, aliviar a rede nas horas de grande procura de energia elétrica e diminuir o risco de falhas [Parvania, 2010]. O Departamento de Energia dos Estados Unidos da América define a DR como “tarifa ou programa estabelecido para motivar alterações no uso de energia

elétrica dos consumidores finais, recorrendo a alterações de preços da eletricidade ao longo do tempo, ou dando pagamentos de incentivo para induzir a redução do uso de eletricidade nos períodos de elevado preço de mercado ou quando a fiabilidade da rede está comprometida” [U.S. Department of Energy, 2006].

Existem dois tipos de programas de DR: programas baseados no preço e programas baseados em incentivos. Os programas baseados em preços têm como objetivo a variação de preço de energia para “forçar” o consumidor a reduzir o seu consumo nas horas de elevada procura de energia elétrica. Contudo, este tipo de programas pode provocar *rebound peaks*, como os relatados na Califórnia [McAuliffe, 2004]. Os programas baseados em incentivos têm como objetivo beneficiar ou penalizar o consumidor, dependendo se este cumpre ou não os pedidos provenientes da rede [Yee, 2012].

As vantagens dos programas de DR permitem uma melhor gestão e harmonização das redes de distribuição de energia elétrica. Contudo, estes programas podem criar um *rebound peak* [Ying, 2012]. Esta designação provém das transferências de consumo de uma hora de ponta de procura de energia elétrica (*on-peak*) para horas de menor procura de energia elétrica (*off-peak*), podendo transformar a hora *off-peak* numa hora *on-peak*. O efeito de *rebound peak* surge da execução em massa de um programa de DR em que poderá provocar que a massa de consumidores aderentes mova o seu consumo para as mesmas horas de menor procura, podendo assim transforma-las em horas de ponta devido ao número excessivo de consumidores.

Com o aumento de produção distribuída nas habitações, o uso de programas de DR cada vez faz mais sentido. A aplicação de programas de DR de modo a colmatar as deficiências das reservas de energia ou das falhas da rede tem ganho cada vez mais forma e adeptos [Li, 2003]. A DR promove uma das formas mais eficientes para a sustentabilidade da rede [Zhong, 2013], transformando-se, deste modo, numa das principais medidas que permitem a aplicação integral das *Smart Grids*.

A integração de contadores inteligentes e o aumento de habitações com automação permitem a exequibilidade dos programas de DR em grande escala. Atualmente, a aplicação de programas de DR já começa a ser feita em alguns países [Medina, 2010]. A utilização de energia eólica e solar são um dos fatores que justifica o uso de programas de DR. Isto deve-se ao facto de a produção destas energias poder sofrer quebras repentinas que podem colocar em causa a fiabilidade da rede. A aplicação de programas nesses momentos poderá permitir equilibrar o consumo e a produção, evitando a utilização de outros recursos necessários para satisfazer a procura de energia elétrica então exigida [Faria, 2013a].

Na ótica das *Smart Grids*, os programas de DR promovem a eficiência, a eficácia e a fiabilidade da rede, reduzindo o consumo nas horas de ponta [Faria, 2013b]. Na ótica do consumidor, os programas de DR permitem uma diminuição da fatura energética [Ying, 2012]. Esta diminuição de custo é possível com a deslocação de consumo das horas de ponta, onde o preço de energia é mais elevado para horas *off-peak*, onde o preço de energia é menor [Madaeni, 2013]. O objetivo dos programas de DR é incentivar os consumidores a alterarem os seus perfis de

consumo de modo a tirar benefícios para a *Smart Grid* e para o consumidor, construindo, assim, uma situação de benefícios mútuos [Hamilton, 2010].

No ano de 2003 foi introduzido, em Chicago, com sucesso um programa de DR de preço em tempo real (RTP¹⁰), o qual foi posteriormente expandido em 2007 [Allcott, 2009]. Este tipo de programa fornece em tempo real o preço de energia a todos os *players* da *Smart Grid*. Em 2005, o operador de sistema independente (ISO¹¹) de Nova Inglaterra, nos Estados Unidos da América, lançou um programa de DR que exigia a redução de consumo por parte dos consumidores. Esta redução era efetuada segundo um aviso prévio do ISO [Parvania, 2010]. [Sioshansi, 2010] mostra que com o uso de programas de RTP é possível eliminar até 93% dos custos de reexpedição associados à produção eólica.

As verdadeiras vantagens dos programas de DR apenas são alcançadas se estes programas forem aplicados em grande escala. A maioria dos programas de DR requer um mínimo de participação [Parvania, 2010]. Este mínimo representa, por norma, um valor elevado para ser conseguido por um único consumidor final, não permitindo, deste modo, uma participação direta nos programas. Porém, a participação dos pequenos e médios consumidores pode ser alcançada através da agregação de cortes produzidos por estes [Ozturk, 2013]. Os *players* agregadores são entidades que aglomeram recursos na rede de forma a alcançar uma maior dimensão [Medina, 2010]. Este tipo de agregadores pode conjugar diversos pequenos e médios consumidores de modo a atingir os mínimos impostos pelo ISO.

O trabalho descrito recorre a um *player* agregador designado por fornecedor de serviços de redução (CSP¹²) [Oliveira, 2013]. Este *player* tem como função a agregação de consumidores para que estes possam participar em programas de DR provenientes do ISO. Ao contrário dos *Players* de Energia Virtual (VPP¹³) [Ramos, 2011], o CSP não possui interação com o mercado nem lança programas de DR, limitando-se apenas à gestão de agregação de consumidor de modo a cumprir o sucesso da execução dos programas lançados pelo ISO.

Os CSP podem ser vistos como representações abstratas de um consumidor, onde o grupo de consumidores é tido como um único consumidor. O CSP é responsável pela participação dos consumidores que agrega, pelos pagamentos a efetuar e pelas ações a tomar caso os consumidores não cumpram o contrato que estabeleceram com o CSP.

O trabalho analisa dois programas de DR, sendo estes o Programa de *Demand Response* em Tempo Real (RTDRP¹⁴) e o RTP. O programa de RTDRP provém da derivação da implementação ocorrida em Nova Inglaterra, nos Estados unidos da América. Este programa foi proposto pela *North American Energy Standards Boar* [NAESB, 2008] e implementa a celebração de contratos antecipados de forma a maximizar a garantia de participação por parte dos consumidores. O programa de RTP define valores em tempo real do preço de energia para os consumidores, não

¹⁰ Real-Time Pricing

¹¹ Independent System Operator

¹² Curtailment Service Providers

¹³ Virtual Power Players

¹⁴ Real Time Demand Response Program

possuindo qualquer exigência nem necessita de celebração de contratos. O consumidor é livre de efetuar as alterações de consumo que achar corretas. Este programa possui uma fase inicial contratual com a definição de requisitos que devem ser cumpridos, e uma fase de execução onde os cortes devem ser executados.

A Figura 4 apresenta as comunicações gerais que ocorrem no programa de RTP. Neste programa, o consumidor tem conhecimento dos preços atuais da energia elétrica; a ação ocorre apenas se o consumidor desejar.

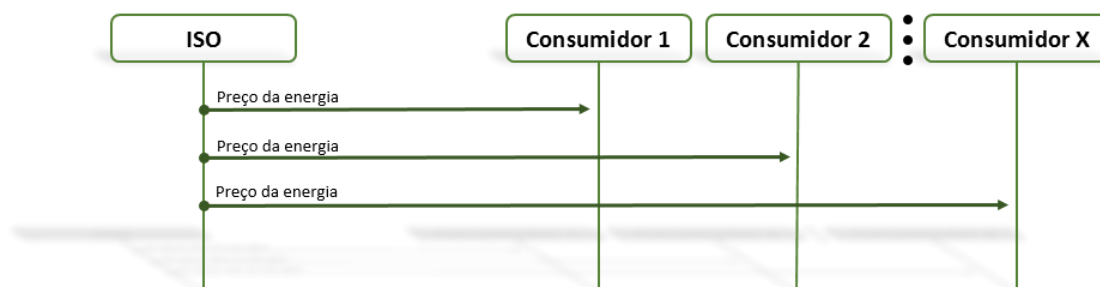


Figura 4 – Fluxo geral de informação do programa de RTP

A Figura 5 apresenta as comunicações gerais do programa de RTDRP, onde existe, primeiramente, uma fase onde são elaborados os contratos e, posteriormente, a execução do programa e respectiva redução de consumo. Aquando da ocorrência do evento, o CSP terá de garantir a execução contratual.

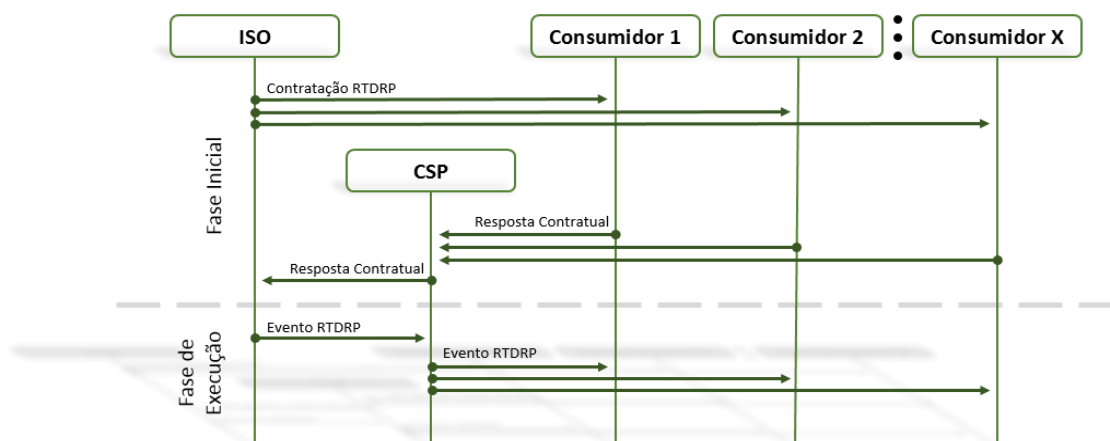


Figura 5 – Fluxo geral de informação do programa de RTDRP

2.4 Sistemas SCADA

Um sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA¹⁵) tem como principal função a aquisição de dados em tempo real, de maneira a disponibilizar ao utilizador a informação atual

¹⁵ Supervisory Control and Data Acquisition

do sistema onde se insere [IEEE, 2008]. Para tal, o sistema SCADA usa uma rede de sensores ligados a uma central [Mollah, 2012]. Além do carácter informativo, fornecido pelos sensores, este tipo de sistema tem a capacidade de ativar alarmes e fornecer apoio à decisão aos operadores [Rajeev, 2010].

Os operadores de sistemas SCADA podem monitorizar o sistema, alarmes, medições de valores e ativar os atuadores que se encontrem instalados no sistema físico [Kang, 2009], permitindo, assim, exercer controlo sobre o sistema físico que se encontra sobre a alçada do sistema SCADA. Os sistemas SCADA são normalmente usados em sistemas de transporte e distribuição de energia, redes de gás, plantas nucleares ou processos industriais. O uso de sistemas SCADA é usual no campo industrial, permitindo de uma forma simples o controlo de sistemas e processos [Kumar, 2010]. Devido a encargos de instalação e custos na aquisição de *software*, os sistemas SCADA tornam-se demasiadamente dispendiosos para os consumidores comuns usarem nas suas instalações [Yoo, 2009]. A Figura 6 mostra o funcionamento genérico de um sistema SCADA.

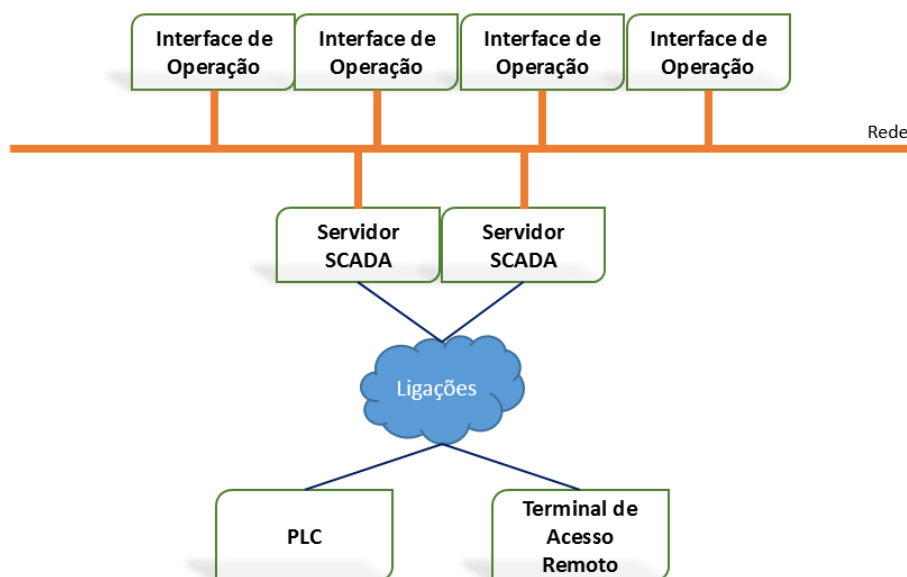


Figura 6 – Implementação genérica de um sistema SCADA [Queiroz, 2011]

Os sistemas SCADA começaram a ser usados no início da década de 1980 [Kardam, 2013]. Originalmente, estes sistemas controlavam sistemas/processos locais. Com a introdução de novas tecnologias, a centralização dos sistemas SCADA foi-se extinguindo, tornando-os em sistemas interligados e dispersos geograficamente [Kang, 2009]. Tal como é descrito em [Mollah, 2012], os sistemas SCADA passaram por três gerações distintas:

- *Primeira geração*: Monolítica – os sistemas SCADA eram centralizados e trabalhavam de forma individual e independente de outros. A central de controlo possuía os seus próprios sensores e estes só a ela respondiam. A centralidade e individualidade desta geração representavam uma dificuldade para abranger sistemas de grande dimensão;

- *Segunda geração*: Distribuída – nesta geração foi abandonado o conceito *standalone*, permitindo a distribuição do sistema via rede local (LAN¹⁶). Este novo conceito permite um aumento da redundância e, como tal, um aumento de fiabilidade do sistema. Esta geração veio permitir o desenvolvimento de sistemas SCADA de maior dimensão que pudessem comunicar à distância via LAN, acabando com a restrição geográfica;
- *Terceira geração*: Rede – semelhante à segunda geração está possui a capacidade de disseminação geográfica do sistema SCADA. Os sistemas não são centralizados mas sim descentralizados e interligados. Contudo, esta geração funciona à base de padrões e sistemas abertos que permitem a sua interligação e colaboração com outros. Estas interligações podem ser efetuadas através via rede de longa distância (WAN¹⁷), não se limitando apenas à comunicação via LAN da segunda geração.

A monitorização e controlo disponibilizados pelos sistemas SCADA permitem aos operadores efetuarem leituras e ações em tempo real, em locais inacessíveis fisicamente (como nas centrais nucleares) ou que se encontrem a grandes distâncias (como as redes de distribuição de energia elétrica [Bobbio, 2009]) [Kumar, 2010]. Para o funcionamento correto dos sistemas, são usados terminais de acesso remoto e autómatos programáveis (PLC¹⁸) de modo a obter os dados e comandar os atuadores [Queiroz, 2011]. A adoção de sistemas SCADA tem vindo a sofrer um aumento de interesse por parte das indústrias e comerciantes, no decorrer do último ano [Ahmed, 2013].

A complexidade de um sistema SCADA depende muito do sistema/processo a que se vai aplicar, podendo ser simples (loja comercial de pequena dimensão) ou extremamente complexo (rede de distribuição de energia elétrica) [Kumar, 2010]. A constituição de um sistema SCADA pode ser decomposta em três componentes: terminal mestre; terminal de acesso remoto; e a ligação entre os dois terminais [Kang, 2009]. O terminal mestre possui uma interface homem-máquina (HMI¹⁹), que permite a interação entre o sistema e o operador de sistema [Kardam, 2013].

Apesar de cada fabricante possuir os seus próprios protocolos de comunicação, os cinco mais comuns são: MODBUS; DNP3; EtherNET/IP; PROFIBUS; e Foundation Fieldbus [Byres, 2004]. A Figura 7 representa algumas formas de ligação entre o terminal mestre e os terminais de acesso remoto. A tipologia das ligações adotadas pelo sistema terá de ser escolhida aquando da estruturação, de modo a optar-se pela tipologia que melhor se enquadra ao sistema.

O aumento de dimensão dos sistemas SCADA, veio proporcionar ligações WAN entre sistemas (terceira geração). Estas ligações externas ao sistema podem representar desvantagens a nível de segurança [Kang, 2009]. A falha de segurança dos sistemas pode ocorrer devido à corrupção de comunicações ou devido a falhas dos terminais de acesso remoto [Guozhen, 2009]. Uma falha de segurança a qualquer nível pode comprometer o sistema por completo. Em Maroochy Shire, em Queensland na Austrália, no ano 2000, o sistema SCADA da central de esgotos sofreu

¹⁶ Local Area Network

¹⁷ Wide Area Network

¹⁸ Programmable Logic Controller

¹⁹ Human Machine Interface

um ataque informático que viria a resultar numa descarga de 800 mil litros de água não tratada para a rede natural de água, provocando danos ambientais consideráveis [Slay, 2007].

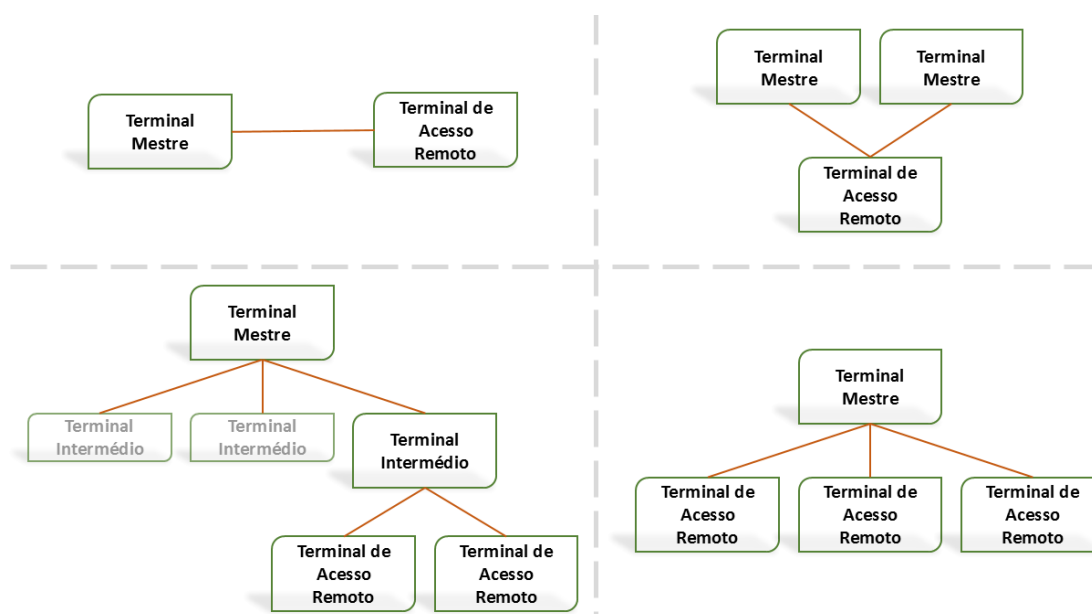


Figura 7 – Tipologias de ligação de Sistema SCADA [Kang, 2009]

Na dissertação foi desenvolvido um sistema SCADA para a gestão e monitorização das cargas do consumidor. O sistema não só é capaz de controlar cargas simulados como também possui a capacidade de simular cargas que não existam em laboratório.

2.5 Demand Side Management

Nos últimos anos tem vindo a notar-se um acréscimo de consumo elétrico, o avanço das tecnologias e o uso intensivo destas na nossa vida quotidiana vem justificar parte desse aumento de consumo [Babu, 2008a]. O perfil comum de consumos numa rede elétrica tem horas de ponta de procura de energia elétrica e horas de baixa procura de energia elétrica. Este cenário de inconsistência no consumo provoca uma queda de eficiência da rede de distribuição. As perdas energéticas das linhas de distribuição são proporcionais à energia que transportam, desta forma, para aumentar a eficiência das redes de distribuição é aconselhável uma redução de consumo [Law, 2012]. A redução de consumo pode ser concretizada com a passagem de consumo das horas ponta para as horas de baixa procura podendo, assim, diminuir as perdas, aumentar a estabilidade e diminuir os custos de operação da rede de distribuição [Wishart, 2011].

A eficiência energética é um dos problemas centrais que a implementação de *Smart Grids* tenta resolver, abordando a otimização a nível de produção, transporte e distribuição [Wishart, 2011]. Em 2008, foi estimado que se for atingido um aumento de eficiência de 5% nas redes de energia elétrica, a poupança que daí resulta será equivalente a eliminar por completo o combustível utilizado e o efeito de estufa causado por 53 milhões de carros [US Department of Energy, 2008].

De forma a possibilitar a redução de consumo nas horas de ponta, surgiu no final da década de 1970 o conceito de gestão da procura (DSM²⁰). Este conceito defende que para reduzir as pontas de consumo, os consumidores terão de efetuar a sua própria gestão de consumos energéticos de modo a homogeneizar os seus valores de consumo diário, saindo do atual perfil onde existem horas de ponta.

As medidas de DSM são mais eficientes do que a gestão de oferta podendo, assim, beneficiar o consumidor e permitir uma redução de impactos ambientais [Gupta, 2012]. A DSM é aplicada a nível mundial como método de controlo das horas de ponta [Qureshi, 2011]. Apesar da aplicabilidade de DSM nos consumidores residenciais representar uma via promissora, o atual uso de DSM faz-se essencialmente em indústrias e em grandes edifícios [Barbato, 2012]. A DSM possibilita uma melhor colaboração entre consumidores e as *Smart Grids*, o que permite atingir o objetivo comum de minimização de custos nas redes de energia elétrica [Wishart, 2011].

Essencialmente, a definição de DSM é “o planeamento, implementação e monitorização das atividades de serviços públicos destinados a influenciar o cliente de energia elétrica, de modo a produzir as alterações desejadas no perfil de consumo produzido pelas cargas utilitárias” [Pandiaraj, 2000]. Estas alterações promovem a inexistência de horas de elevada procura de energia elétrica. Um dos principais objetivos da aplicação de DSM é evitar a necessidade de construção de centrais geradoras que apenas funcionem durante um número reduzido de horas diárias, apenas para satisfazer as pontas de procura de energia elétrica [Babu, 2008a].

Na literatura, as aplicações de DSM dividem-se em dois modelos de implementação e aplicação:

- *Modo offline* – a aplicação de DSM em modo *offline* prende-se a algoritmos e ações que se pretendem executar no futuro. Para este tipo de aplicação, é necessário o uso de técnicas de previsão de consumos e preços na rede de forma a poder-se encontrar as melhores soluções possíveis a serem executadas. Por norma, este tipo de aplicação fornece o escalonamento das cargas durante um período futuro, podendo ser o período diário ou horário. Para se poder executar a DSM com sucesso é necessário possuir previsões precisas e ter definido quais as cargas a serem executadas no período para o qual os algoritmos estão a ser executados;
- *Modo online* – o modo *online* tem o objetivo de efetuar a DSM em tempo real, quando necessária. A necessidade de redução de consumo pode provir do operador do sistema, da configuração da instalação ou de ordens do utilizador. Este tipo de DSM não necessita de algoritmos pesados para efetuar previsões de consumo, nem dos preços estipulados pela rede para períodos futuros. A sua desvantagem a nível computacional prende-se ao facto de ter que agir no instante e, como tal, lidar com a situação que se encontram a decorrer sem este as poder controlar.

Para se poder implementar a DSM são necessários dispositivos de controlo à distância de maneira a incutir alterações de estado nas cargas a eles conectados. Como exemplo deste tipo de comunicação temos o *power line* que permite que diversos dispositivos comuniquem através

²⁰ Demand Side Management

da rede elétrica, permitindo a aplicação de DSM em edifícios [Chen, 2010]. No entanto, no mercado existem diversas técnicas, físicas ou protocolares, para efetuar comunicações por cabo ou *wireless* entre diversos dispositivos.

O uso de DSM em grande escala é, por norma, aplicada a certos tipos de cargas (por exemplo, aparelhos de ar condicionado ou cilindros), e apenas a edifícios de uma certa dimensão que congregam várias cargas e se tornam mais apelativos por parte do operador de rede. A Taiwan Power Company possui contratos de DLC que lhe permitem controlar os aparelhos de ar condicionado de alguns edifícios [Lu, 2006]. Este controlo é efetuado através de um sinal da rede que ativa um dispositivo ligado ao ar condicionado; este dispositivo é instalado e fornecido pela Taiwan Power Company. Os contratos DLC permitem o controlo direto, por parte dos operadores, de cargas instaladas nos consumidores. Porém, este controlo direto representa, por norma, custos elevados para o operador comparativamente com outros métodos de incentivar a DSM.

Apesar de o uso de contratos DLC permitir a aplicação de DSM, este método não se torna, em geral, eficaz quando executado em instalações residenciais. Um contrato DLC implica o controlo das cargas perante o operador, tornando a gestão do sistema mais complexa. A aplicação de contratos DLC para a totalidade de cargas existentes numa instalação residencial, não só não é viável como iria sobrecarregar a gestão da rede de energia elétrica [Wishart, 2011]. Posto isto, a abordagem mais indicada será a descentralização do controlo de cargas para as residências.

O sistema desenvolvido neste trabalho usa algoritmos *online* para a aplicação de DSM de modo a promover a redução de consumos em pequenos e médios consumidores. De seguida, serão descritos alguns sistemas propostos por diversos autores que têm como principal objetivo a aplicação eficiente de DSM.

Bright Energy Equipment

O sistema proposto em [Barbato, 2012] faz parte do Politécnico de Milão, tendo como objetivo a análise de técnicas de DSM a serem aplicadas em ambientes de *Smart Grid*. O sistema usa residências com painéis fotovoltaicos e baterias de armazenamento. O sistema foi implementado em C++ e usa dados reais de consumidores italianos; a residência usada para teste possui 11 equipamentos elétricos.

A particularidade deste contributo é a execução de dois algoritmos distintos para maximizar a eficiência da DSM. O sistema usa um algoritmo *offline* para prever a produção fotovoltaica e o consumo da residência. O algoritmo funciona para 24 horas com períodos de 15 minutos. Seguindo estas previsões, o sistema consegue efetuar o escalonamento das cargas.

Para prevenir erros de previsão, frequentes nestas situações, o sistema possui ainda dois algoritmos que podem ser executados em modo *online*. Os dois algoritmos são concorrentes, tendo o administrador que optar por um deles. A base dos dois algoritmos é a mesma – diminuir a diferença entre a produção e o consumo.

Os algoritmos *online* são executados no início de cada período de 15 minutos e podem, caso necessário, carregar ou descarregar baterias e escalonar novamente os períodos futuros de modo a acomodar os imprevistos com que o sistema foi deparado. A combinação dos dois algoritmos (*online* e *offline*) pretende colmatar os erros inerentes nas previsões necessárias nas técnicas *offline*.

Sistema proposto em [Quintero, 2012]

O sistema proposto em [Quintero, 2012] tem como objetivo a comparação de técnicas de DSM quando aplicadas numa divisão. A divisão usada para simulações contém as seguintes cargas: um aparelho de ar condicionado; quatro computadores; uma televisão LED; e quadro lâmpadas fluorescentes. Para realizarem simulações mais precisas, os autores fizeram leituras reais para a totalidade dos equipamentos usados (Tabela 1).

Tabela 1 – Consumos de cargas

Carga	Estado	Consumo (kWh)
Ar Condicionado	Desligado	0,0
	<i>Sleep</i>	0,6
	Ligado	1,9
Computador/LCD	Desligado	0,0016
	Hibernado	0,0100
	Suspenso	0,0018
	Ecrã Desligado	0,0560
	Ligado	0,0780
Televisão LED	Ligado	0,000
	Desligado	0,105
Lâmpadas Fluorescentes	Ligado	0,00
	Desligado	0,04

O sistema proposto pelos autores usa redes neuronais para produzir as preferências de cada carga. Para tal, são usadas como entrada a informação referente à temperatura, luminosidade e presença de pessoas. As redes neuronais artificiais são *feed forward* e *back propagation*.

O simulador aplica DSM segundo quatro critérios definidos pelos autores: prioridades de cargas; DLC; escalonamento de cargas; e condições adequadas. A comparação dos quatro critérios podem ser observados em [Quintero, 2012]. A produção de resultados conta com variáveis de conforto que devem ser cumpridas, tais como as temperaturas e os níveis de luminosidade.

Energy Demand Management Simulator

Os autores de [Guo, 2008] propõem um simulador capaz de simular consumidores residenciais, estados ambientais, contratos DLC e a satisfação de cada consumidor. O sistema tem a capacidade de simular mais de um milhões de consumidores e residências, podendo, assim, lidar com inúmeros estilos de consumidores. O seu objetivo é testar o impacto de contratos DLC

em equipamentos de ar condicionado dentro das residências, promovendo uma DSM controlada pelo operador. Como implementação futura, os autores, propõem a implementação de DSM executada nas residências em vez de esta ser controlada pelo operador.

Nas simulações, o DLC é apenas executado em aparelhos de ar condicionado. A opção por esta escolha, segundo os autores, prende-se por estes equipamentos representarem a maior percentagem de consumo na Austrália, pelo facto da complexidade existente no seu controlo e pelo facto de estes equipamentos estarem diretamente conectados com o conforto dos consumidores (principalmente em dias extremos de calor ou frio).

O sistema lida com três tipos de residentes nas habitações: jovens com ou sem filhos; jovens e idosos sem filhos; e idosos sem filhos. Estes três tipos foram optados devido aos autores terem concluído que as idades dos consumidores provocam alterações nos seus padrões de consumo.

O simulador usa algoritmos genéricos para proceder à otimização de consumos, tendo sempre em conta os níveis de conforto dos consumidores. Durante as execuções de contratos DLC, os autores defendem que os consumidores podem anular os efeitos das execuções e controlar diretamente o ar condiciona, recusando, assim, os cortes previamente efetuados. Assim, os autores propõem a adoção de benefícios para os consumidores cumpridores e penalizações para os não cumpridores. Em [Guo, 2008] é possível visualizar alguns métodos de benefícios e penalizações idealizadas pelos autores.

Para efeitos de simulação, os autores usam temperaturas externas reais. Contudo, aplicam as mesmas temperaturas para a totalidade das residências. Como caso de estudo, os autores disponibilizaram os resultados da Figura 8. Nesta figura é possível visualizar o consumo dos ares condicionados com e sem otimização e respetiva execução de contratos DLC.

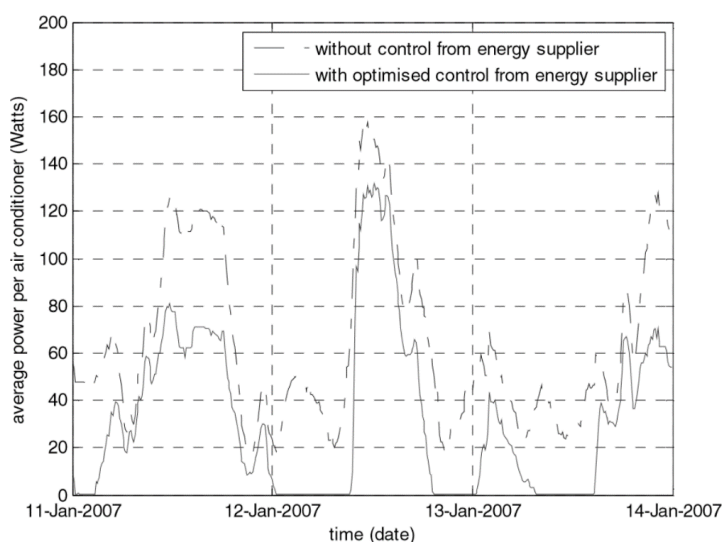


Figura 8 – Resultados obtidos em [Guo, 2008]

O trabalho descrito neste documento conta com a aplicação de DSM em modo *online* para promover a integração de pequenos e médios consumidores nas *Smart Grids*. O uso de DSM e respetivos algoritmos usados são abordados na secção 3.2.

2.6 Redes Neurais Artificiais

A inspiração das redes neuronais artificiais (ANN²¹) advém do modelo biológico de neurónios cerebrais. Uma ANN pretende simular os neurónios biológicos, as interligações entre eles e produzir conhecimento [Bhurtun, 2011]. O grupo de neurónios interligados usa modelos matemáticos para conseguir transformar os dados de entrada nos dados de saída pretendidos [Babu, 2008b]. Para tal, as interligações entre neurónios são alteradas de forma a produzir-se o resultado esperado. Estas interligações sofrem alterações durante a passagem de informação na rede sempre que esta sofre um treino [Dharme, 2006].

O uso de ANN foi iniciado por Hu em 1964 para aplicar a previsões meteorológicas. As primeiras ANN eram chamadas de *single-layer perceptron*. Este tipo de ANN era apenas composto por uma única camada de neurónios, sendo esta a saída [Babu, 2008b]. A Figura 9 demonstra um exemplo de uma *single-layer perceptron*. Com o avanço do uso de ANN foi necessária a introdução do conceito de *multi-layer preceptron*. Este tipo de ANN possui múltiplas camadas de neurónios [Babu, 2008b]. A Figura 10 demonstra um exemplo de uma *multi-layer preceptron* composta por três camadas de neurónios.

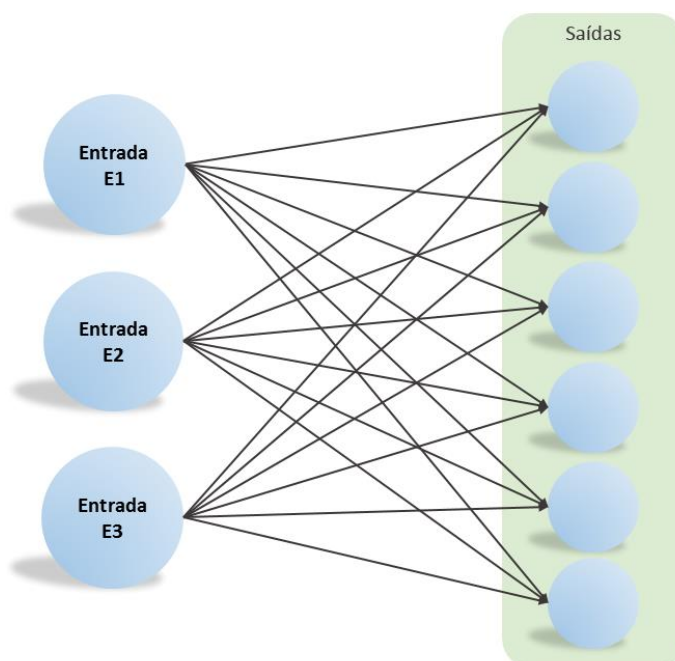


Figura 9 – *Single-layer perceptron* ANN

²¹ Artificial Neural Network

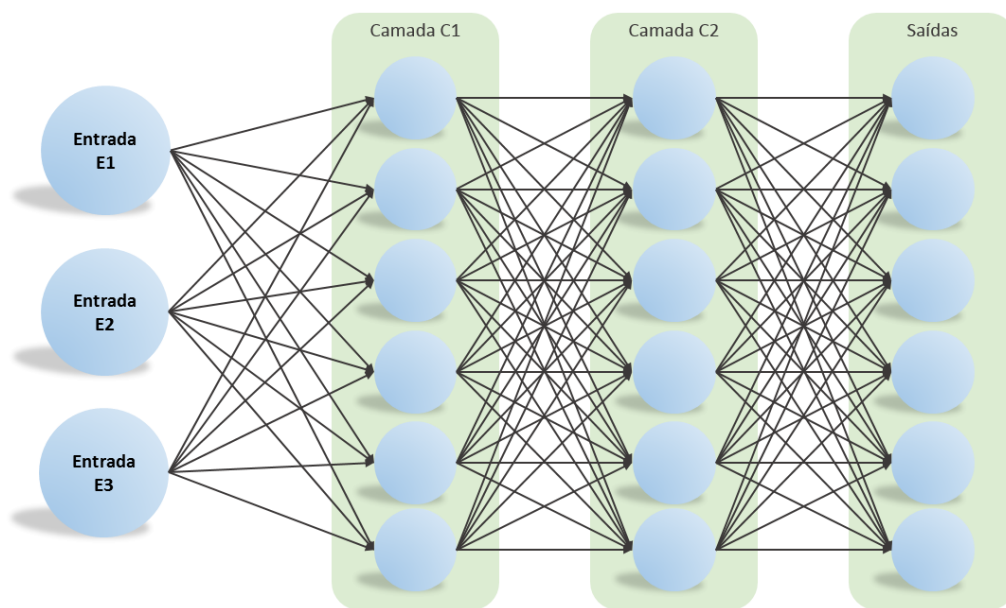


Figura 10 – *Multi-layer perceptron* ANN

Após a estruturação da ANN, esta precisa de passar um processo de treino de modo a ajustar os pesos de cada interligação entre neurónios, tal como ocorre no cérebro biológico [Bhurtun, 2011]. A Figura 11 mostra o algoritmo simplificado de treino de uma ANN. Os pesos são ajustados dentro do neurónio artificial. O funcionamento do neurónio, visível na Figura 12, segue duas etapas: primeiramente, o neurónio soma todos os valores de entrada que recebe; de seguida, aplica-lhe a função de ativação [Bhurtun, 2011]. Esta função produz um resultado que será enviado para o neurónio seguinte. A soma de entradas possui pesos que são atribuídos a cada interligação, ou seja, nem todos os valores têm o mesmo peso. Desta forma é possível fortalecer certos tipos de interligações e dar-lhes mais importância.

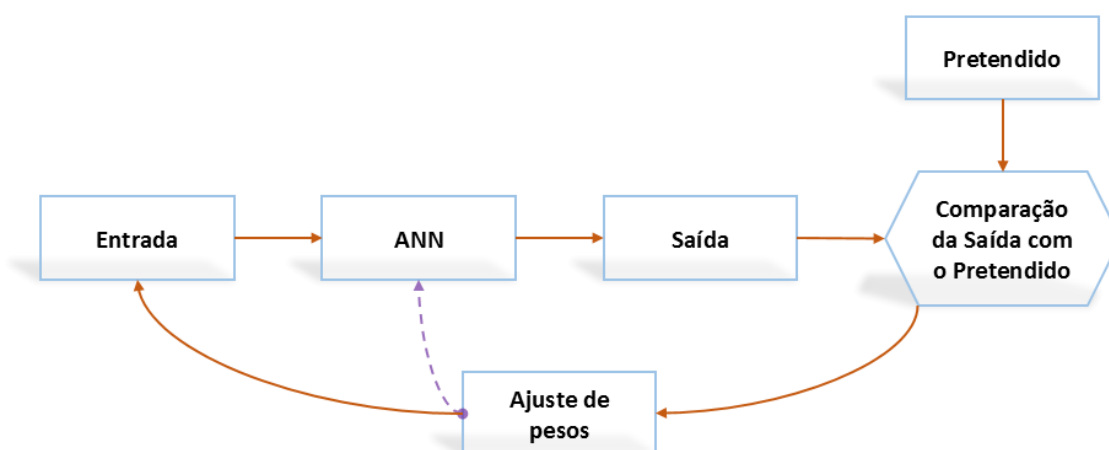


Figura 11 – Algoritmo simplificado de treino de uma ANN

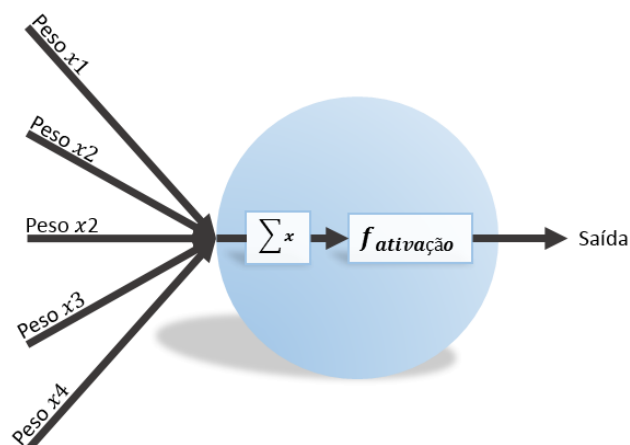


Figura 12 – Funcionamento interno de um neurónio artificial [Bhurtun, 2011]

Para além dos *single-layer perceptron* e do *multi-layer perceptron*, as ANN podem ainda ser classificadas de acordo com as interligações. As mais usadas são a *feed forward* e a *recorrente*, a *feed forward* possui interligação apenas de um sentido (da entrada para a saída da rede) e a *recorrente* possui interligações bilaterais [Bhurtun, 2011].

O uso de ANN é importante quando se pretende usar fórmulas não lineares. A sua aprendizagem permite a aplicação de fórmulas que o utilizador desconhecia [Calabrese, 2007]. Contudo, é essencial ter uma boa base de treinos para as redes de forma a esta poder produzir resultados de qualidade. A estruturação de uma ANN, no que toca ao número de neurónios, não é um processo científico e só será alcançado com a aplicação de diversos testes de maneira a provar a sua estabilidade.

Um dos problemas que pode surgir com a má estruturação de uma ANN é o *over-fitting*, ou seja, o sobre-ajustamento da rede aos dados de treino [Bhurtun, 2011]. Este sobre-ajustamento pode tirar o dinamismo esperado da ANN. Nestes casos, a rede funciona na perfeição para os casos de treino mas torna-se incapaz de produzir bons resultados quando deparada com dados de entrada diferentes dos ocorridos durante treino.

O uso de ANN para a sua aplicação em DSM não é algo novo. Sistemas como os propostos em [Babu, 2008b], [Calabrese, 2007] e [Bhurtun, 2011] usam ANN para aplicar DSM em consumidores. No entanto, o seu uso difere do aplicado no sistema proposto deste documento. O uso de ANN em aplicações de DSM tende a ser aplicado em previsões de consumo, como em [Bhurtun, 2011], ou em escalonamentos, como em [Babu, 2008b]. Por sua vez, o sistema proposto neste documento usa as ANN para a produção de preferências de cargas, tendo em conta a aprendizagem com o utilizador. O uso de ANN para a produção de preferências de cargas pode ser visto em [Quintero, 2012], onde é usada uma ANN para cada carga. No sistema proposto neste documento é aplicada uma ANN para a totalidade das cargas, como pode ser visto na secção 3.4.

3 Descrição do Sistema GAIC

Este capítulo diz respeito a toda a conceção e implementação do sistema GAIC que foi desenvolvido nesta dissertação. O capítulo encontra-se subdividido em quatro secções distintas. Na secção 3.1 será abordado o sistema multiagente desenvolvido no âmbito desta dissertação. Na secção 3.2 serão descritos os agentes representantes dos pequenos e médios consumidores. Estes agentes são parte integrante do sistema multiagente descrito na secção 3.1. Na secção 3.3 será descrita a implementação do sistema móvel desenvolvido para controlar os agentes descritos na secção 3.2. Por último, na secção 3.4 serão abordadas as redes neuronais usadas durante a execução do trabalho. Todos os sistemas apresentados nestas secções serão unificados de forma a obter o sistema GAIC.

3.1 MASGrIP

Para tornar possível a imersão do GAIC num ambiente de *Smart Grid*, foi implementado um sistema multiagente, denominado MASGrIP, capaz de simular uma *Smart Grid*. Este sistema possui diversos agentes que interagem através de comunicações bilaterais e autónomas. Cada agente possui o seu próprio objetivo delimitado.

O sistema multiagente desenvolvido para o trabalho foi implementado em C#. A comunicação entre agentes é efetuada através de *sockets* e a informação que circula nas comunicações segue modelos XML capazes de serem interpretados por qualquer agente do sistema.

Nas seguintes subsecções serão abordados os agentes existentes no sistema multiagente, o modo de comunicação entre eles e os agentes externos que podem interagir com o sistema multiagente. As últimas duas subsecções vão-se debruçar sobre a apresentação do sistema MASCEM, sistema este que pode ser conectado com o MASGrIP e a plataforma JADE, que representará o futuro do sistema multiagente MASGrIP.

3.1.1 Arquitetura do Sistema Multiagente

O sistema multiagente desenvolvido nesta dissertação tem como função a simulação de uma *Smart Grid*. Para se alcançar esse objetivo foi implementado, em C#, o sistema esquematizado na Figura 13. As ligações entre agentes foram conseguidas através do uso de *sockets*. Este tipo de ligação foi adotada devido à independência que esta traz ao sistema, fazendo uso do protocolo TCP/IP. Este tipo de ligação é multiplataforma e encontra-se implementada na maioria, ou mesmo totalidade, das linguagens de programação.

O número de agentes que integram o MASGrIP depende largamente da simulação que se pretende efetuar. Apesar da existência de agentes fixos e únicos, o sistema engloba diversos agentes que permitem replicabilidade e, portanto, o seu número só é definido após o utilizador configurar a simulação que deseja executar.

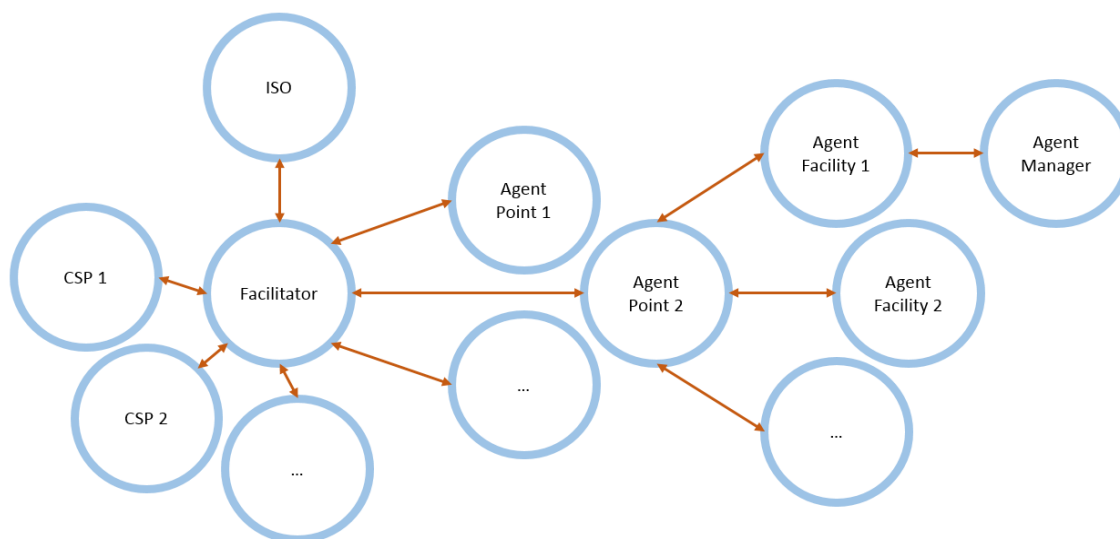


Figura 13 – Esquema da arquitetura do sistema multiagente MASGrIP

Facilitator

A função deste agente, tal como o nome indica, é ser o facilitador principal do sistema, dando apoio aos outros agentes e servindo de núcleo principal do MASGrIP. Este agente funciona como uma central de comunicações e interligações. O grosso das comunicações circula através deste agente.

ISO

Este agente representa o operador de sistema (ISO), que no MASGrIP tem a seu cargo a responsabilidade de despoletar eventos na rede. Estes eventos podem ser eventos de *demand response* ou o estabelecimento de novos preços de energia paga pelos consumidores finais. Este agente é único e representa operador de sistema, e tem o poder de controlar e dar ordens à *Smart Grid*. O desenvolvimento deste agente não se encontra na sua fase final, tendo sido desenvolvido apenas para testes. Esta escolha foi adotada devido a, no futuro, este agente ser substituído por outro já previamente implementado.

CSP

Sendo um agente agregador (secção 2.3 deste documento), o CSP tem como objetivo agregar consumidores que não possuam dimensão suficiente para participar, em nome individual, em programas de *demand response*. No sistema multiagente desenvolvido, este agente tem como função a construção de contratos entre os consumidores de forma a garantir a participação dos mesmos nos programas de *demand response* lançados pelo agente ISO. Apenas os consumidores que pretendam participar nos eventos e que não tenham a capacidade de corte necessária para elaborar contratos com o ISO é que recorreram ao CSP. Cada consumidor tem de definir com qual CSP é que pretende negociar, devido à existência de vários no sistema.

No lançamento de programas de *demand response* o CSP aguarda as respostas dos consumidores e só celebrará contratos quando possuir 160% do poder de corte mínimo exigido pelo ISO. Durante a aplicação de eventos, onde os consumidores que possuem contrato têm de cortar o consumo, o CSP tem de gerir os cortes e garantir que estes ultrapassem o mínimo exigido pelo ISO. Para tal, o CSP possui quatro tipos de atuação nos eventos: participar usando apenas os cortes normais conseguidos pelos consumidores; participar usando os cortes normais mais um extra proveniente de alguns consumidores; participar usando os cortes normais, mais os cortes extras e mais os cortes provenientes por contratos de DLC; ou não participar no evento. Nos contratos DLC encontram-se definidas cargas, do consumidor, que o CSP pode controlar diretamente sem a intervenção do consumidor.

Quando ocorre o evento, o CSP pede aos consumidores que indiquem qual o seu poder de corte normal, extra e por DLC. Para contornar incumprimentos dos consumidores, o CSP apenas participa nos eventos caso possua 120% do poder de corte mínimo exigido pelo agente ISO. Se o poder de corte normal for igual ou superior a 120% do mínimo exigido, o CSP participa no evento. Caso contrário, o CSP vai verificar se o corte normal mais o corte extra é igual ou superior a 120% do mínimo, caso se verifique o CSP participa no evento. Caso contrário, o CSP vai verificar se o corte normal, mais o corte extra e mais o corte proveniente de contratos DLC, é superior a 120% do mínimo exigido. Se esta condição for verdadeira, então o CSP participa no evento; caso contrário o CSP recusa-se em participar no evento. Na Figura 14 encontram-se esquematizadas as respostas possíveis do CSP perante um evento de *demand response*.

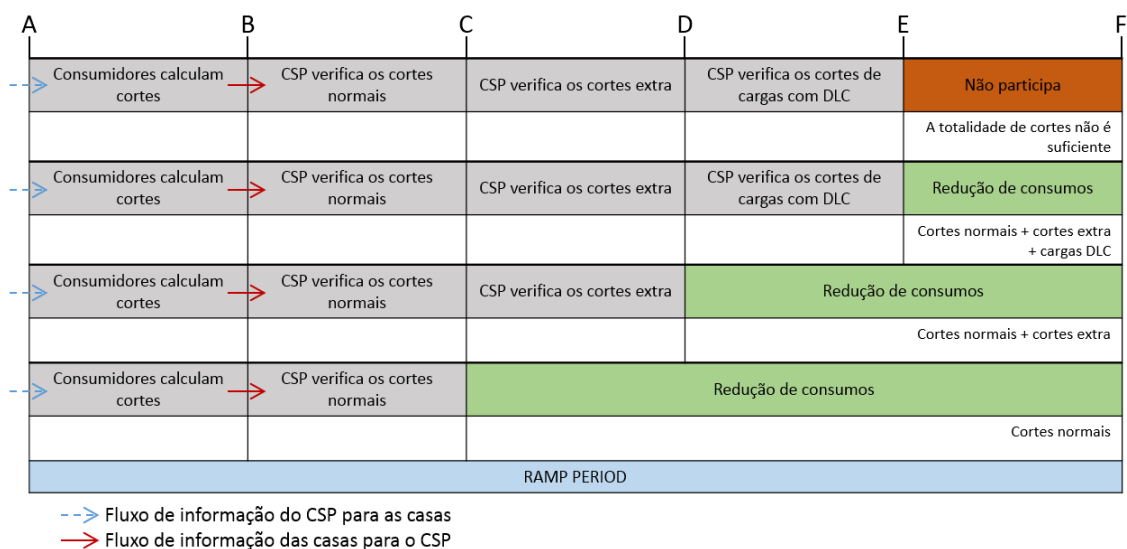


Figura 14 –Atuação do CSP perante o despoletar de um evento de corte [Gomes, 2014]

AgentPoint

Este agente pode ser representativo de uma *microgrid*, a ele encontram-se ligados os consumidores. Pode também ser interpretado como um facilitador de apoio ao agente Facilitador. Os consumidores que estejam conectados ao mesmo *AgentPoint* não necessitam de passar pelo Facilitador para comunicarem. O número de *AgentPoints* existentes no MASGrIP é variável consoante o número que desejamos simular.

AgentFacility

É este o agente responsável por simular o consumidor base. Permite simular cargas de consumo e ligar-se a cargas físicas, dependendo da sua configuração. O agente é configurável através de um ficheiro XML externo ao programa. O agente tem ainda de se ligar a um *AgentPoint*. A estrutura e capacidades deste agente serão abordadas mais à frente neste documento, na secção 3.2. Como cada agente deste tipo representa um consumidor, o número de agentes vai depender da simulação que se deseja correr.

HouseManager

O *AgentFacility* funciona como um servidor de gestão e controlo das cargas. No entanto, não possui interface que permita aos utilizadores interagirem com o agente. Para colmatar esta necessidade, o agente *HouseManager* foi desenvolvido como um agente de interface. Ele encontra-se desenvolvido para apenas servir como interface, no entanto é dotado de capacidades de comunicação e pode possuir autonomia. São essas circunstâncias que nos permitem tratar o *HouseManager* como agente. Devido a apenas interagirem com o *AgentFacility*, e por norma não provocarem alterações ou reações no MASGrIP, este tipo de agente é denominado agente externo (secção 3.1.3). Um *AgentFacility* pode conter mais do que um *HouseManager* a ele ligado.

3.1.2 Comunicações

As conexões entre agentes encontram-se efetuadas usando ligações por TCP/IP. Isto permite efetuar uma ligação direta e livre. Para se proceder ao controlo de informação foi necessário desenvolver um sistema de comunicações que respeita uma nomenclatura comum. Toda a informação que circula no MASGrIP encontra-se em formato XML. A adoção pela linguagem de marcação XML possibilita a estruturação da informação onde esta pode ser facilmente acedida. A grande maioria das linguagens de programação utilizadas nos dias correntes possui mecanismos que facilitam as leituras de ficheiros e estruturas em XML.

A estrutura de comunicação adotada no sistema multiagentes desenvolvido para nesta dissertação encontra-se demonstrada no Código 1. Dentro do elemento principal, denominado *Block*, existe o elemento que contém corpo da mensagem – este elemento denomina-se *Message*. Os elementos demonstrados no Código 1 são de uso obrigatório e necessários para o bom funcionamento do sistema geral. O elemento *Type* do XML define o tipo de mensagem que se encontra a trocar. Deste modo, o agente que a recebe sabe que tipo de ação e/ou reação a ter. Tanto o elemento *Source* como o *Destination* referem-se ao caminho em que a comunicação vai fluir. Estes campos são necessários para o reencaminhamento das comunicações por parte dos facilitadores. O último elemento obrigatório, denominado *Description*, é o que irá conter a informação da comunicação. O conteúdo do elemento *Description* é constituído por outros elementos, porém, o seu número e tipo de elemento é variado e apenas definido pelo tipo da comunicação (elemento *Type*), ou seja, um tipo de comunicação que diga respeito aos preços de energia nas últimas 24 horas tem que conter, no elemento *Description*, vários elementos que armazenem os preços.

```
<Block>
  <Message>
    <Type>
      Tipo da mensagem
    </Type>
    <Source>
      Origem da mensagem
    </Source>
    <Destination>
      Destino da mensagem
    </Destination>
    <Description>
      Elementos específicos do tipo (<Type>) de mensagem
    </Description>
  </Message>
</Block>
```

Código 1 – Estrutura genérica de um XML de comunicação entre agentes

De forma a maximizar o desempenho do sistema, no que diz respeito às comunicações entre agentes, os facilitadores do MASGrIP (*Facilitator* e *AgentPoint*) disponibilizam serviços mais

completos do que os normais mecanismos de reencaminhamento de comunicações. Estes tipos de serviços são executados quando os facilitadores rececionam uma comunicação cujo destino não se encontra definido. Caso o destino esteja declarado como “All”, significa que o facilitador irá lançar uma comunicação em modo *broadcast* para a totalidade dos agentes consumidores. Contudo, neste sistema, as mensagens em modo *broadcast* requerem dos agentes consumidores uma resposta. Estas respostas podem ser reencaminhadas pelo facilitador à medida que chegam a ele, ou então podem ser agregadas apenas numa mensagem e transmitida para o agente que iniciou a comunicação. A escolha, desde a ação por parte do facilitador, depende do tipo de comunicação com que ele esteja a lidar. Outro serviço prestado pelo facilitador é o de procura de agentes consumidores, comunicações que tenham no campo de destino o valor “Find” possuem no elemento *Description* um elemento denominado *IDHouse* que terá o nome textual do consumidor do qual o facilitador terá de procurar o respetivo agente.

Na Figura 15 temos um exemplo de comunicações no momento de conexão entre o agente ISO com o agente Facilitator. Após a ligação por *sockets*, o agente Facilitator envia ao novo agente ISO (usado neste exemplo) um código de identificação, que é o *hashcode* da ligação estabelecida. O agente ISO deverá guardar este código, para futuras validações, e deverá proceder à sua identificação. Por último, o agente Facilitator aceita a ligação do novo agente ISO.

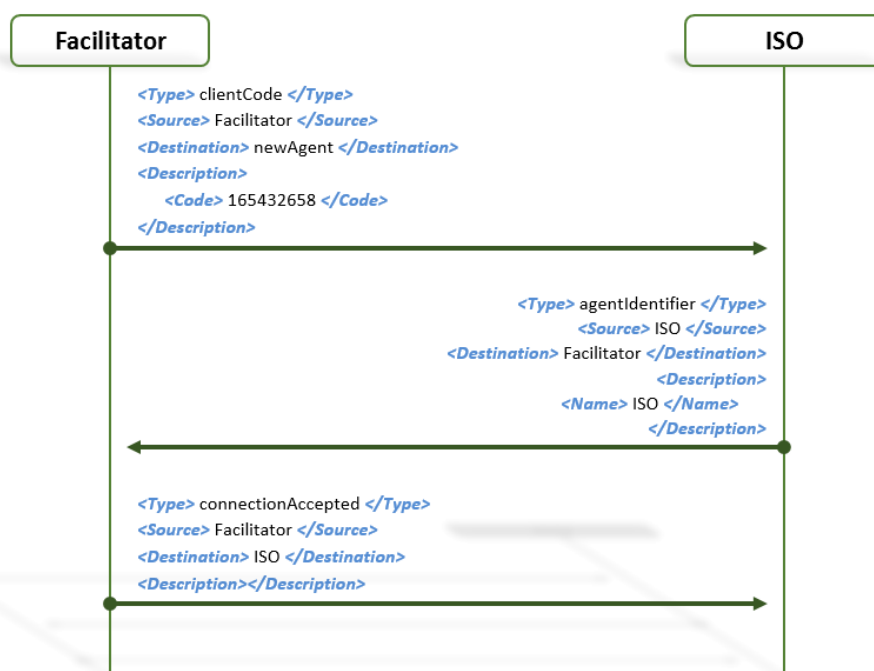


Figura 15 – Exemplo de comunicações: conexão entre agentes

O método adotado para efetuar as conexões entre agentes e o método adotado para se procederem às comunicações usa e segue padrões comuns na grande maioria das linguagens de programação existentes.

3.1.3 Agentes Externos

Além dos agentes apresentados na secção 3.1.1, é permitido pelo sistema que mais agentes interajam com ele. Esta interação nem sempre poderá provocar reações no sistema, prendendo-se apenas na visualização e esquematização das ações e reações resultantes do sistema. É considerado um agente externo todo o agente que não seja obrigatório no sistema ou que não tenha sido desenvolvido especificamente para este sistema.

Os agentes *HouseManager* são considerados externos por não integrarem nenhuma componente inteligente. Contudo, eles podem produzir um impacto indireto no MASGriP. Este agente permite a uma pessoa comum visualizar a situação atual no agente *AgentFacility*. O *HouseManager* permite ainda que o utilizador efetue ações que podem implicar uma mudança de consumo dentro da instalação. Por efeito, esta mudança de consumo refletir-se-á na *Smart Grid*.

Agentes que não foram desenvolvidos de raiz para o MASGriP são considerados externos. Esta separação permite-nos definir com clareza quais os agentes constituintes do núcleo do sistema. Agentes como os VPPs do sistema MASCEM são, portanto, considerados agentes externos. Os VPPs fornecerão a ligação entre o MASGriP e o MASCEM. Contudo, estes agentes já se encontravam desenvolvidos e, como tal, são tratados como agentes externos.

3.1.4 MASCEM

O MASCEM é um sistema multiagente que pretende simular mercados competitivos de energia, nomeadamente o MIBEL, EPEX e NORD POOL [Praça, 2003]. Este sistema integra diversos conceitos de mercado, tais como, a utilização de *day-ahead*, mercados de ajuste, programas de *demand response* e *ancillary services*. A constituição do MASCEM congrega um número conjunto de agentes, sendo que os mais relevantes refletem entidades reais presentes nos mercados de energia [Vale, 2011]. Sendo o objetivo fulcral deste sistema o estudo e simulação de mercados de energia elétrica, o MASCEM torna-se um complemento ao MASGriP e vice-versa.

Com a união e colaboração entre o MASCEM e o MASGriP é possível alcançar um sistema que complemente a componente de mercado e a componente do consumo em tempo real. Esta colaboração é possível recorrendo aos agentes VPPs presentes no MASCEM. Um VPP é uma entidade que participa nos mercados de energia e que agrega consumidores de pequena e média dimensão. A principal diferença entre um CSP e um VPP é a capacidade que o VPP têm para agregar consumidores com energia distribuída e executar programas de *demand response*, em vez de apenas se limitar a agregar consumidores para programas externos.

Usando os VPPs do MASCEM como agentes externos no MASGriP, é possível unificar os dois sistemas, culminando num sistema multiagente completo e com possibilidades infinitas no que toca a simulações de mercados e consumos energéticos.

3.1.5 JADE

As comunicações presentes no MASGrIP (descritas na secção 3.1.2) encontram-se a funcionar satisfatoriamente, levando a cabo a tarefa para a qual foram projetadas. Contudo, tendo em conta desenvolvimentos futuros foi adotada uma medida para se proceder a uma reestruturação do sistema a nível programático. Só assim se poderia garantir que agentes desenvolvidos por entidades externas pudessem de uma forma simples integrar com sucesso o MASGrIP.

Inicialmente contava-se apenas alterar o método de comunicações para que este usasse as normas FIPA, permitindo assim a integração de agentes externos que respeitem os mesmos padrões de comunicações. Uma análise mais cuidada na arquitetura do sistema fez com que fosse tomada a decisão de transplantar todo o sistema MASGrIP e MASCEM para a plataforma JADE.

A plataforma JADE permite a criação de sistemas multiagentes recorrendo à linguagem de programação Java. A plataforma foi criada pela Telecom Italia encontra-se distribuída em modo *open-source* sobre os termos da Lesser General Public License Version 2. A vantagem mais significativa do uso desta plataforma é o facto de ela respeitar as normas da IEEE da FIPA, quer a nível de comunicações quer a nível estrutural. As normas FIPA decretam padrões a serem seguidos a nível de comunicação, como é o caso de ontologias para que os agentes tenham as mesmas interpretações e estejam em sintonia com elas, e também padrões a serem seguidos na arquitetura do sistema, como é o caso de agentes facilitadores.

3.2 Agente Instalação

Nesta secção é abordado o agente que simula e/ou controla a instalação elétrica. No âmbito deste documento, o termo instalação refere-se a um pequeno e médio consumidor. É neste agente que o foco da dissertação recai. No agente instalação serão abordadas várias metodologias de simulação, controlo, monitorização e automação da instalação. Durante o decorrer do trabalho, houve a necessidade de alterar significativamente a implementação e metodologias utilizadas por este agente. Como tal, esta secção não tratará apenas de descrever o agente atual, como também irá descrever as alterações efetuadas, explicando sempre a necessidade que levou à alteração estrutural do agente.

3.2.1 Movicon

O programa de *software* Movicon é um programa padrão utilizado na automação industrial, no controlo à distância e na automação de edifícios. O *software* fornece ferramentas que possibilitam criar facilmente um sistema SCADA, capaz de controlar cargas reais ou simular cargas. O Movicon contém diversos protocolos de comunicação capazes de controlar equipamentos sem a necessidade de programação exaustiva. Contudo, ele fornece a possibilidade de o utilizador empregar a linguagem de programação Visual Basic para efetuar operações para o qual o Movicon não se encontra definido.

Na instituição de acolhimento – o GECAD – já existia um sistema implementado no Movicon que consistia no controlo de um PLC e na simulação discreta de cargas. Este sistema possuía ainda uma ligação a um ficheiro em MATLAB que, com o apoio do GAMS, produzia otimizações de consumo e aplicava o seu resultado nas cargas. A ligação entre o Movicon e o MATLAB era efetuada segundo a linguagem de programação Visual Basic; a ligação entre o MATLAB e o GAMS era efetuada internamente no ficheiro MATLAB. As cargas ligadas ao PLC podem ser visualizadas na Figura 16.

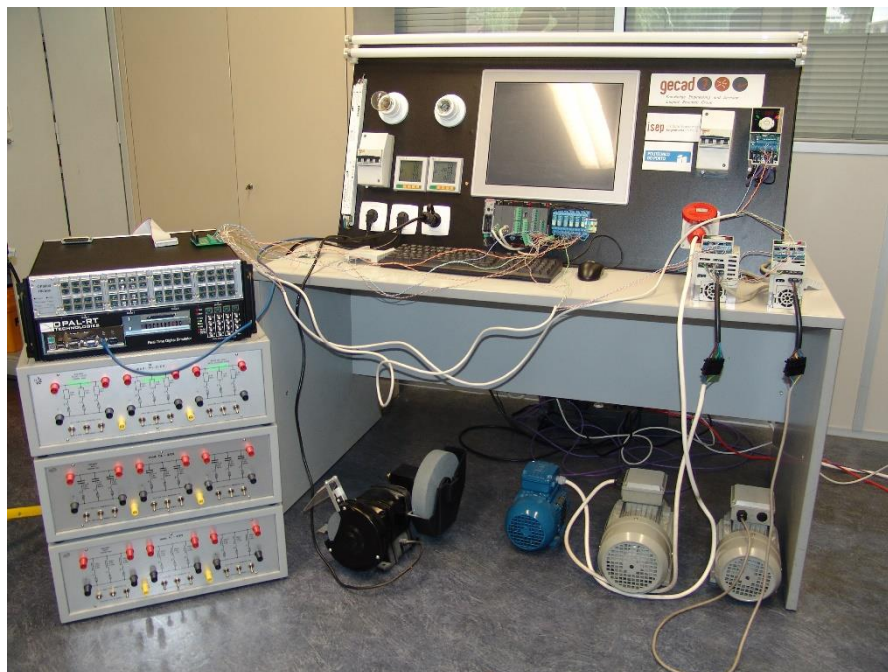


Figura 16 – Laboratório de cargas existentes no GECAD

Inicialmente, no trabalho, utilizou-se o programa desenvolvido em Movicon para produzir um *AgentFacility* que integrasse o MASGrIP que foi apresentado na secção 3.1. Devido às limitações apresentadas pelo Movicon, esta metodologia foi posta de parte. Na altura foi conseguida com sucesso uma ligação entre o MAS e o Movicon. Porém, o tempo de reação não era o adequado e continuava-se a enfrentar graves limitações por parte do Movicon (tais como o facto de não permitir ligações por *sockets*).

3.2.2 Simulador em C#

Para contornar as limitações do Movicon, era necessário primeiramente entender as comunicações que este efetuava com o PLC. A comunicação com o PLC permite o controlo de cargas reais e, como tal, é um ponto essencial para o trabalho. O PLC usado no GECAD é o IMO XGB Programmable Logic Controller – DC Power Main Unit XBM-DN32S da LS Industrial Systems. Este equipamento possui 6 cartas: uma delas é responsável por uma ligação Ethernet que funciona com o protocolo MODBUS. Este protocolo é maioritariamente usado em sistemas de automação industrial. O seu uso alargado na indústria originou que algumas linguagens de

programação possuísem bibliotecas específicas para procederem à comunicação com equipamentos que usem esse protocolo.

A linguagem de programação C# enquadrava-se nos requisitos do trabalho e, como tal, foi a adotada para a implementação de um agente capaz de controlar, monitorizar e simular cargas. Foi ainda utilizado o subsistema gráfico *Windows Presentation Foundation* (WPF) da Microsoft, permitindo assim uma maior dinâmica na criação de interfaces e preparando o agente para os novos sistemas Windows.

O agente implementado em C# aqui apresentado integra o MASGriP como sendo um *AgentFacility*, tendo ainda a funcionalidade de ser um sistema SCADA relativo às cargas reais que integra. A arquitetura do agente encontra-se esquematizada na Figura 17. As principais funções que o agente teria de ser capaz de efetuar são as seguintes: controlar cargas reais usando a comunicação com o PLC existente; simular cargas discretas que não existam no laboratório; e otimizar as cargas de forma a diminuir o consumo. O agente ainda teria que ser capaz de simular qualquer pequeno e médio consumidor que os utilizadores quisessem, e possuir comunicações com a *Smart Grid* simulada no MAS apresentado na secção 3.1.

Na Figura 17 podem visualizar-se os diferentes módulos e funcionalidades existentes no agente. O agente usa o simulador como base do sistema, o simulador apenas simula cargas discretas, ou seja, cargas que apenas podem estar ligadas (a consumir o máximo de energia) ou desligadas (sem consumo elétrico). A ligação ao PLC, como já foi mencionado, é conseguida segundo o protocolo MODBUS. O uso de uma biblioteca própria permite que apenas com o endereço IP do PLC se efetue a ligação, a leitura e escrita de valores é efetuada segundo os endereços de memória do PLC, que armazenam/gravam os valores. A leitura das posições de memória do PLC permite ao simulador recolher o estado da carga (ligada/desliga) e o seu consumo momentâneo. A escrita nas posições de memória permite alterar os estados da carga.

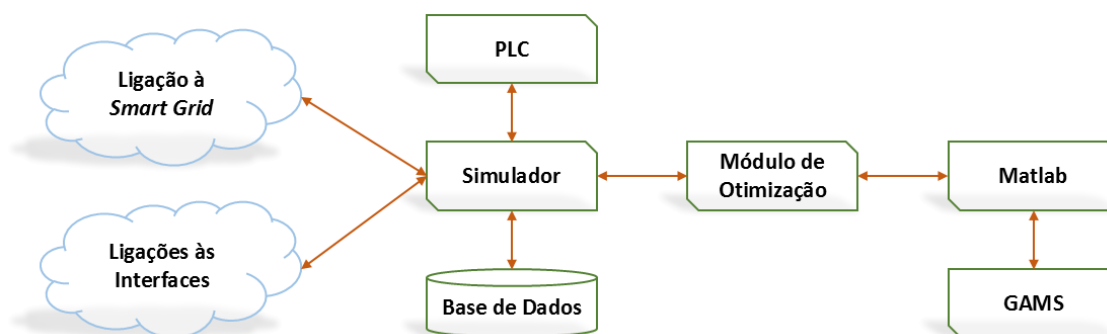


Figura 17 – Arquitetura do simulador implementado em C#

A nível de serviços, o agente possui uma base de dados e um módulo de otimização de cargas (ambos visíveis na Figura 17). A base de dados encontra-se implementada em SQL Server. Esta armazena diversos dados do agente e do MAS, tais como os consumos do agente e o preço de energia por quilowatt-hora que foram aplicados no decorrer do tempo. O módulo de otimização faz uso de um algoritmo, que já se encontrava implementado, para produzir otimizações no sistema de cargas. Este algoritmo encontra-se implementado em MATLAB e possibilita a

otimização segundo algoritmos genéticos ou segundo uma otimização determinística que faz uso do GAMS. Como tal, obrigou a que o agente permitisse ligações a programas desenvolvidos em MATLAB. Para isso usou-se a referência MApp que integra o pacote do Visual Studio 2012 possibilitando, assim, o uso de ficheiros MATLAB. O módulo de otimização é responsável pelo envio de dados para o ficheiro MATLAB e pela leitura de resultados e respetiva aplicação destes no agente. O agente apenas faz uso da otimização determinística.

O agente tem de garantir, além da ligação ao PLC, duas ligações permanentes. A ligação à *Smart Grid* é essencial para a inclusão do agente ao MAS do trabalho. É por esta ligação que passa toda a comunicação referente ao MAS. A ligação às interfaces é necessária pois este agente não possui qualquer interface. Existem agentes externos próprios para se conectarem ao *AgentFacility* para que os utilizadores possam comandar a instalação. Todas as ligações são efetuadas por *sockets*, permitindo assim a cada agente ser executado na sua própria máquina.

Apesar de ser um único agente, este não se prende a apenas um processo. Simultaneamente o agente encontra-se a executar quatro processos distintos, fundamentais para alcançar as funcionalidades necessárias do agente. A Figura 18 ilustra esses mesmos quatro processos que ocorrem durante a execução do agente. A Comunicação com a *Smart Grid* é o processo que se encontra sempre à escuta de informação e mensagens provenientes do MAS, este processo encontra-se a correr num *thread* capaz de ficar à escuta do *socket* de ligação ao MAS. A continuidade deste processo é fundamental para simulações que envolvam a ligação do agente instalação aos MAS, como é o caso da análise de programas de *demand response*.

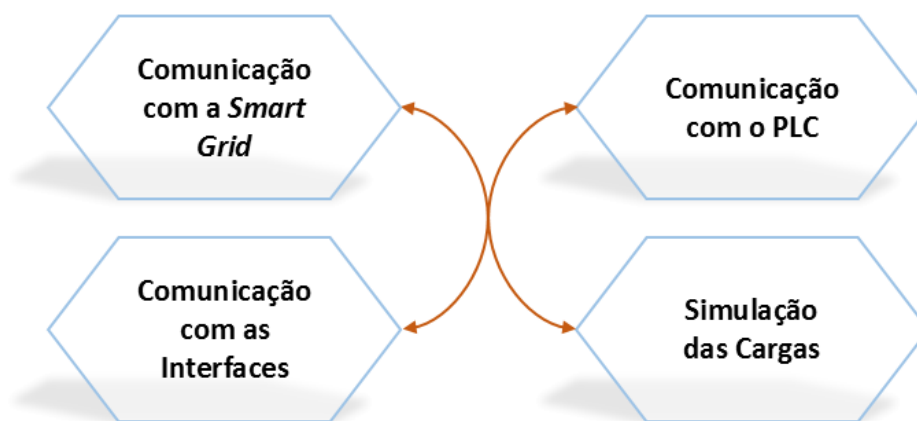


Figura 18 – Processos a serem assegurados pelo agente em C#

Para que o controlo e monitorização contínua das cargas sejam possíveis, o agente possui o processo de Comunicação com o PLC (Figura 18). Este processo faz a monitorização constante das cargas e atualiza os seus estados no agente. Este processo possui comunicações assíncronas com o PLC, na *thread* referente a este processo são efetuados pedidos constantes do estado das posições de memória do PLC. De seguida, na função de receção de informação proveniente do PLC, os dados são recebidos, analisados e armazenados alterando, assim, os estados das cargas.

A comunicação entre o agente e as interfaces é efetuada no processo de Comunicação com as Interfaces (Figura 18). Este processo é responsável por alertar os agentes, das interfaces externas, de alterações referentes ao agente instalação, e é também responsável pelo tratamento da informação proveniente dos agentes externos das interfaces. Todas as comunicações são efetuadas com o apoio de XML, tal como as comunicações entre agentes do MAS. A *thread* de receção de mensagens das interfaces possui mecanismos de descompactação do XML e a sua respetiva análise e reação.

O último processo do agente é a gestão de cargas simuladas, que fica ao encargo do processo de Simulação das Cargas da Figura 18. Este processo tem apenas de manusear as cargas que se encontram a ser simuladas no agente, mantendo sempre as cargas atualizadas. É a combinação destes quatro processos que permite ao agente efetuar as suas tarefas de uma forma completa e eficiente. Apesar de existirem quatro processos distintos, todos eles são, de certa forma, dependentes dos outros. Direta ou indiretamente, todos eles precisam de informação de outros processos ou provocam alterações nos outros processos.

O agente instalação implementado é todo ele configurável através de um XML (Anexo A). Aqui o administrador pode configurar: a estrutura da instalação, como as divisões e as cargas; as características das cargas, se são físicas ou simuladas, a potência máxima, a posição de memória no PLC e se são discretas ou variáveis; as condições de contratos que o agente aceita na *Smart Grid*; e a informação referente aos dados geográficos onde o pequeno e médio consumidor se encontra.

O agente instalação encontra-se a funcionar e faz parte de casos de estudo apresentados no capítulo 4. Porém na fase final do trabalho existiu a necessidade da passagem do MAS para a plataforma JADE. Esta mudança alterou o conceito do agente instalação. Ao implementar o agente instalação em Java tornava-se possível aproveitar os seus serviços de simulação e otimização, para aplicar num agente consumidor/produtor da plataforma JADE. Contudo, o agente instalação foi concebido em Java para prestar serviços e para funcionar autonomamente sem a necessidade do MAS.

3.2.3 Simulador em Java

O simulador desenvolvido em Java tem como objetivo elevar o desempenho e capacidades do antigo simulador desenvolvido em C#. O simulador terá também de ser capaz de integrar outro agente, funcionando como uma biblioteca de simulação de um pequeno e médio consumidor.

Na Figura 19 é apresentada a arquitetura do simulador implementado em Java. Esta arquitetura foi desenvolvida tendo em conta as exigências que o simulador teria de responder, e os paradigmas a que se teria de acomodar num prazo futuro.

Tal como se pode verificar, a arquitetura presente na Figura 19 é baseada na arquitetura apresentada na Figura 17. No entanto, no simulador implementada em Java desaparece o módulo de Ligação à *Smart Grid*, devido ao simulador em Java funcionar como uma biblioteca

a ser usada por um agente, cabendo a este a comunicação com a *Smart Grid*. O módulo PLC não desaparece, apenas passa para um nível mais acima, lado a lado com outros métodos de cargas. Os módulos a tracejado encontram-se atualmente em implementação.

No núcleo da arquitetura do simulador podemos encontrar o módulo Simulador (Figura 19). Este é o módulo responsável pela simulação. Para que o simulador funcione de forma autónoma, sem a ligação a nenhum agente ou *Smart Grid*, foi necessária a criação de um módulo que lida-se com as comunicações com interfaces externas ao simulador (módulo Ligações às Interfaces Externas). As interfaces externas serão abordadas mais à frente neste documento nas secções 3.1.3 e 3.3.2.

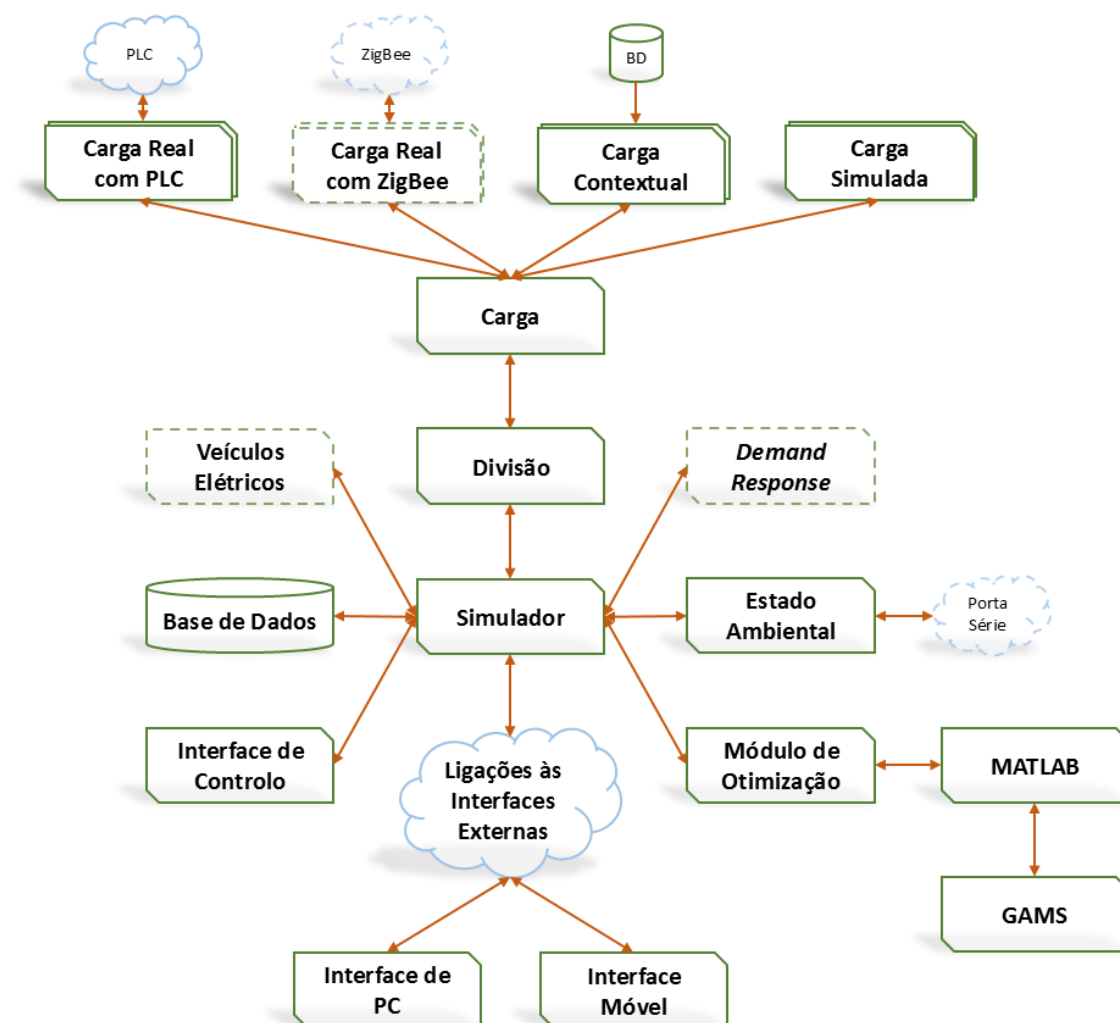


Figura 19 – Arquitetura do simulador em Java

Para além das interfaces externas, que comunicam com o simulador, existe ainda uma interface de controlo integrada no simulador. Esta interface tem a capacidade de alterar as variáveis que afetam o estado do pequeno e médio consumidor a nível ambiental e ocupacional. As alterações são efetuadas em tempo real e durante a execução da simulação, permitindo assim lidar com mudanças ambientais e/ou ocupacionais. As alterações que se podem efetuar são: a

mudança de dia e hora; a alteração da temperatura exterior ao pequeno e médio consumidor; a alteração da temperatura interior do pequeno e médio consumidor (podendo ser definidas temperaturas diferentes para cada divisão); a alteração da luminosidade sentida no pequeno e médio consumidor (podendo também serem definidas diferentes luminosidades para diferentes divisões); e a alteração da presença de pessoas em cada divisão (podendo definir o número de pessoas que se encontram em cada divisão).

O módulo do Estado Ambiental é responsável pelo armazenamento e gestão da informação ambiental da instalação. Este módulo armazena não só os dados gerais do pequeno e médio consumidor, como também transmite alterações ambientais e ocupacionais para cada divisão individual. Atualmente, as alterações apenas podem ser efetuadas através da Interface de Controlo. No entanto, encontra-se a decorrer um projeto de final de licenciatura do curso de Eletrotecnia e Computadores que se compromete a desenvolver centrais capazes de adquirir informações ambientais e ocupacionais relativas às divisões. Comunicando, via porta série, com o módulo do Estado Ambiental para efetuar leituras reais e usa-las no simulador. As informações recolhidas por essas centrais são: a temperatura ambiente; a humidade relativa; a luminosidade; a presença de pessoas; e a identificação das pessoas através de um leitor RFID.

O Módulo de Otimização, semelhante ao simulador em C#, permite alocar diversos algoritmos de otimização que podem ser usados pelo simulador. Os algoritmos podem ser implementados em Java, MATLAB ou ainda MATLAB com auxílio do GAMS. Este simulador lida com vários tipos de otimização, permitindo a comparação entre algoritmos para situações semelhantes de execução. A integração com o MATLAB foi possível utilizando o MATLAB Builder JA, esta ferramenta permite converter funções em MATLAB em classes de Java. Para se poder fazer uso da ferramenta MATLAB Builder JA, é necessário que todos os ficheiros de MATLAB sejam transformados em funções únicas. A máquina que vai receber as classes provenientes do MATLAB Builder JA tem de ter instalado o MATLAB Compiler Runtime (da mesma versão do MATLAB que efetuou a conversão de ficheiros). Caso os ficheiros de MATLAB usem o GAMS, então a máquina de destino terá que conter a variável de ambiente que aponta para o GAMS.

Os módulos de Veículos Elétricos e *demand response* ainda não se encontram totalmente implementados. No entanto, a sua importância para simulações futuras levou a que tivessem sido pensados desde o início da estruturação do simulador. O módulo de Veículos Elétricos será responsável pela ancoragem de veículos elétricos no pequeno e médio consumidor, tendo como responsabilidade a comunicação e negociação com os veículos. A nível de veículos elétricos existem dois panoramas distintos no que toca à gestão de recursos, existem veículos que apenas aceitam a recarga de baterias (*Battery electric vehicle*) e existem veículos que permitem a recarga e descarga de baterias (*Vehicle-to-grid*). Os *Battery electric vehicle* podem ser levados em conta como uma carga comum (apesar de a otimização poder levar em conta ainda atributos como: estado da bateria; número de quilómetros que o utilizador do veículo necessita fazer com o carro; e o tempo em que o carro se vai encontrar ligado ao pequeno e médio consumidor). No entanto, os *Vehicle-to-grid* possuem uma gestão mais complexa, dependendo dos contratos que permitem. O módulo de Veículos Elétricos será responsável pela análise contratual e pelas permissões e prioridades que estes acarretam na simulação.

O módulo de *demand response* terá como função a gestão de programas de *demand response* provenientes da *Smart Grid*. Os programas de *demand response* são uma temática importante no ambiente de *Smart Grid*. Estes programas vão permitir uma maior dinâmica aos consumidores e vão, pela primeira vez, permitir que estes possuam uma participação ativa na rede. Este módulo será responsável por definir quais os procedimentos a serem efetuados aquando da receção de um programa *demand response*, e como terá de o acompanhar o programa no decorrer do tempo de modo a garantir a sua participação. No Simulador em C#, este módulo encontra-se totalmente implementado, no entanto, não é tido em conta como um módulo, mas sim como uma componente integrada no módulo Simulador.

No decorrer da simulação, o módulo Simulador executa o acompanhamento da simulação. Deste acompanhamento resultam três ações: a gravação de consumo para o módulo Base de Dados; a divulgação de alterações, caso existam, para as interfaces externas; e o acompanhamento contínuo das opções de otimização.

Para possibilitar uma melhor estruturação da instalação, o simulador possui um módulo que complementa as Divisões existentes no simulador. Cada divisão é uma classe em Java que contem variáveis ambientais e ocupacionais da divisão, tais como: número de pessoas presentes na divisão; luminosidade da divisão; temperatura sentida na divisão; e humidade relativa da divisão. Cada divisão possui ainda uma lista de cargas que congrega no seu interior.

O módulo Carga diz respeito às cargas envolventes no simulador. Cada carga é uma classe e pode ser um de quatro tipos diferentes de carga: Carga Real com PLC; Carga Real com ZigBee; Carga Contextual; e Carga Simulada. Dentro de cada tipo ainda existe a opção de a carga ser discreta ou variável. A implementação e estruturação das cargas foi um aspeto fulcral para o sucesso do simulador. A Figura 20 apresenta o esquema de classes em Java usadas para que fosse possível acomodar a totalidade dos oito tipos de cargas que o simulador possui.

O esquema de classes representado na Figura 20 teve como objetivo a abstração, encapsulamento, herança e polimorfismo de classes de forma a permitir um código mais estruturado e funcional. No centro do esquema encontram-se os 8 tipos de cargas existentes, estas cargas diferem no modo de simulação/monitorização e no modo de controlo:

- *Carga Discreta Simulada* – esta classe diz respeito a cargas discretas (apenas possuem a funcionalidade de ligar e desligar) que se encontrem a ser simuladas puramente pelo simulador, ou seja, não possuem qualquer fonte externa que forneça os valores, o simulador define o consumo consoante a ação dada pelo utilizador da instalação;
- *Carga Discreta Contextual* – é a classe que representa cargas discretas que se encontrem a ser simuladas seguindo leituras reais de consumos. Muitas das vezes, torna-se impossível a simulação viável de equipamentos específicos ou a integração física destes equipamentos no simulador. Esta classe permite que sejam retiradas leituras reais ao equipamento, que se pretende simular, para que o simulador possa seguir a ordem das leituras e produzir a realidade experienciada durante as leituras do equipamento;

- *Carga Discreta ZigBee* – classe que contém cargas discretas que se encontrem a ser controladas através do protocolo ZigBee, este controlo e monitorização de cargas reais através do protocolo ZigBee é possível usando dispositivos eletrónicos produzidos para o efeito. Este tipo de dispositivo foi desenvolvido no âmbito da dissertação e como tal são abordados na secção 3.2.4;
- *Carga Discreta PLC* – esta classe representa cargas discretas reais que se encontram a ser controladas e monitorizadas por um PLC. Estas cargas já existiam antes do trabalho, sendo que o seu controlo e monitorização faziam parte dos requisitos do simulador. Com esta ligação torna-se possível controlar cargas reais no simulador;
- *Carga Variável Simulada, Carga Variável Contextual, Carga Variável ZigBee e Carga Variável PLC* – estas classes são similares às previamente vistas, na sua respetiva ordem. Contudo, dizem respeito a cargas variáveis, i. e., que permitem ao simulador controlar a intensidade do fluxo de potência, controlando assim os níveis de consumo despendidos pela carga (um exemplo de uma carga variável é uma lâmpada regulada com um dínamo).

Para facilitar o manuseamento dos vários tipos de cargas, foram implementadas diversas interfaces de classe em Java. Estas interfaces de classe encontram-se exibidas na Figura 20, tendo permitido ao simulador tratar as cargas da forma mais generalizada possível. Tal como na Figura 19, as classes e interfaces de classe a tracejado presente na Figura 20 ainda se encontram em implementação.

A nível de funcionamento de cargas, o simulador possui três cenários que envolvem mecanismos de permanente execução: cargas contextuais, controladas por ZigBee ou ligadas ao PLC obrigam ao simulador um acompanhamento permanente para detetar alterações nas cargas. Nas cargas de contexto, o simulador começa por ler e armazenar internamente as leituras de consumo, seguindo por um despoletar de uma *thread* responsável por efetuar as alterações de consumo. Esta *thread* possui um ciclo infinito e vai apenas, caso a carga esteja ligada, alterar o valor de consumo, a periodicidade de execução da *thread* é definido nas leituras. O ficheiro de leituras deve conter a hora das leituras. No momento em que o simulador lê o ficheiro, é encontrada a periodicidade das leituras para que está seja aplicada no *sleep* da *thread*, resultando na replicabilidade das leituras realizadas. As cargas que comunicam por ZigBee possuem um mecanismo semelhante às cargas contextuais. Cada carga lança uma *thread* que fica responsável pela comunicação com a carga, efetuando as monitorizações e realizando o controlo da mesma.

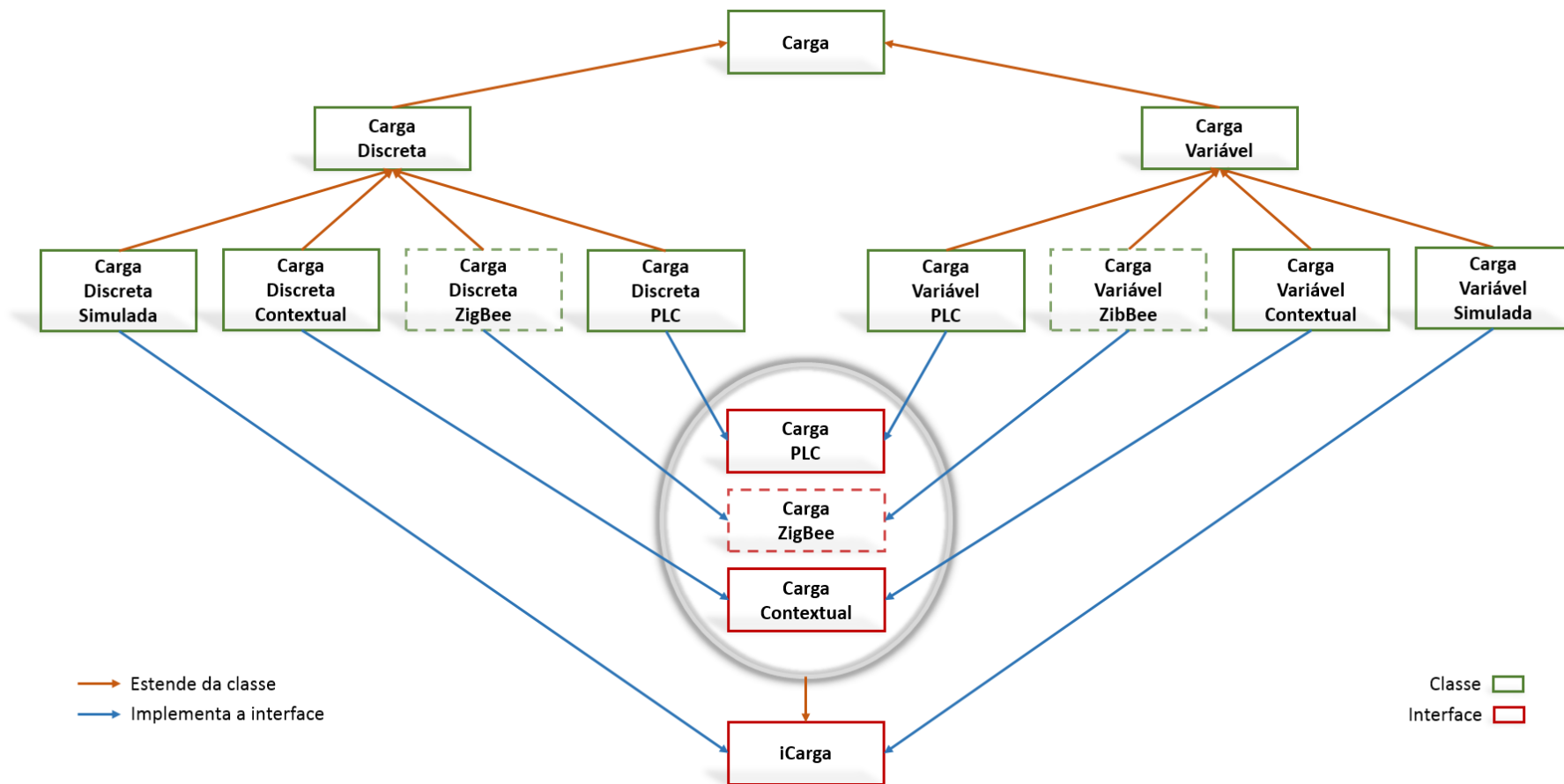


Figura 20 – Esquema de classes, em Java, referentes às cargas

As cargas que usam a ligação ao PLC têm um mecanismo distinto das restantes, o simulador congrega uma classe denominada *MonitoringPLC* que efetua a monitorização do PLC e de seguida comunica as alterações a cada carga individual. Esta opção deveu-se à quantidade de tráfego exagerado que iria resultar caso cada carga possua a sua própria ligação ao PLC. Como neste caso existe apenas um simulador e apenas um PLC, assumiu-se que o caminho a seguir passaria pela existência de uma única ligação entre ambos. Assim, a classe *MonitoringPLC* agrega todas as Cargas PLC e efetua a sua monitorização e controlo. Cada carga tem uma posição de memória referente ao estado e outra referente ao consumo, existindo as cargas variáveis que ainda possuem uma terceira posição de memória que define a variação de potência. O que a classe *MonitoringPLC* faz é o aglomerar de posições, efetuando apenas uma leitura ao PLC, ou seja, em vez de ler cada posição individualmente, a classe lê um bloco de posições (desde a mais baixa usada numa carga até a mais alta usada numa carga). Este processo permite tirar um maior desempenho das leituras, tendo leituras em tempo-real. Após a sua implementação, este simulador conseguia efetuar mudanças de leituras mais atempadamente que o *software* industrial Movicon (secção 3.2.1).

A Figura 21 apresenta os processos que decorrem durante a execução do simulador. A execução permanente destes processos vem garantir o funcionamento global do simulador. No caso do simulador em Java, existe um processo principal (Simulação do Sistema) que coordena o simulador e lança todos os outros processos. As funcionalidades e objetivos dos processos do simulador são:

- *Simulação do Sistema* – este processo é o núcleo do simulador, onde é efetuada a coordenação da totalidade dos processos, sendo ele o responsável pela configuração inicial do simulador;
- *Simulação das Cargas Contextuais* – tal como já foi mencionado, as cargas contextuais produzem processos para efetuar alterações de consumo durante a simulação, este processo é responsável por essas alterações nas cargas contextuais;
- *Comunicação com o PLC* – a comunicação com o PLC decorre, no simulador, num processo único devido à permanente monitorização às cargas que é necessária efetuar;
- *Comunicação ZigBee* – este processo diz respeito às comunicações permanentes que o simulador necessita possuir com os dispositivos que usam o protocolo ZigBee;
- *Veículos Elétricos* – o processo dos veículos elétricos, atualmente em desenvolvimento, irá controlar os veículos ancorados ao pequeno e médio consumidor. Este processo necessita ser contínuo para poder monitorizar e controlar os veículos;
- *Estado Ambiental* – atualmente este processo não se encontra desenvolvido. No entanto encontra-se a decorrer o desenvolvimento de um protótipo que se enquadrará neste processo. Este processo destina-se à comunicação com as centrais eletrónicas de medição de variáveis ambientais dentro das divisões;

- *Comunicação com as Interfaces* – este processo permite ao simulador possuir uma comunicação permanente com as interfaces externas, essencial para a alteração em tempo real de parâmetros nas interfaces;
- *Interface de Controlo* – tal como foi discutido previamente, o simulador possui uma interface de controlo capaz de alterar, em tempo de execução, os parâmetros ambientais e ocupacionais do pequeno e médio consumidor simulado. Este processo é responsável por essa escuta da interface e reação do simulador.

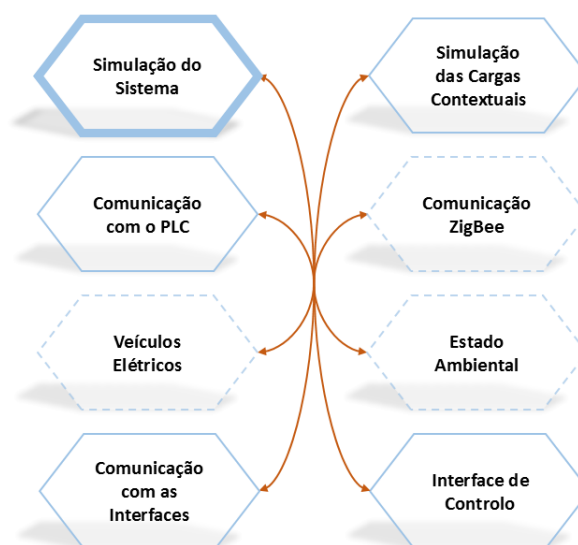


Figura 21 – Processos a serem assegurados pelo simulador Java

Todo o simulador é configurável segundo as iniciações que são efetuadas. Cabe ao administrador do simulador a definição e estruturação da instalação que se pretende usar. Seguindo este princípio, o administrador tem que configurar os seguintes parâmetros base: as divisões da instalação; as cargas de cada divisão; o endereço e porta TCP/IP do PLC a usar (caso exista ligação ao PLC); a localização da base de dados que se irá usar na simulação; o dia e hora da simulação; as temperaturas; a luminosidade; a utilização de otimizações. Caso sejam necessários, o simulador terá que previamente carregar os conteúdos de MATLAB de modo a poder realizar as otimizações; a iniciação de interfaces externas (caso existam); e a iniciação da interface de controlo (caso exista a necessidade de a usar).

3.2.4 Dispositivos ZigBee

Como foi mencionado na secção 3.2.3, existem atualmente seis tipos de cargas a uso do simulador, mais dois tipos de carga a serem desenvolvidos. Este capítulo inclui a descrição das cargas monitorizadas e controladas através do protocolo ZigBee. Este controlo de cargas é importante para o trabalho devido à dinâmica que proporciona.

A idealização do dispositivo provém desta dissertação. Contudo, o seu desenvolvimento eletrónico foi conseguido por um aluno da Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. O trabalho do aluno foi realizado no âmbito da cadeira de Projeto/Estágio cuja

coorientação foi levada a cabo pelo autor deste documento, sendo que o autor possui habilitações em Eletrotecnia.

Os requisitos iniciais deste dispositivo prendiam-se pelas funções de substituir interruptores e tomadas tradicionais por interruptores e tomadas capazes de monitorizar e controlar à distância as cargas a que se encontram conectadas. O controlo à distância teria que obrigatoriamente ser efetuado através de comunicações *wireless*, de modo a não obrigar o utilizador a despendar de custos monetários para alterar as infraestruturas.

O protocolo ZigBee foi adotado devido às suas capacidades a nível de segurança de dados, e ao facto de os módulos xBee conterem portas de entrada e saídas próprias. O tratamento entre os interruptores e as tomadas é meramente estético e não interfere com o esquema eletrónico do dispositivo.

O circuito eletrónico esquematizado na Figura 22 é capaz de lidar com cargas discretas e variáveis. A variação de potência da carga, necessárias nas cargas variáveis, é conseguida através do uso de um TRIAC que tem que receber impulsos consoante a frequência da rede elétrica. Isto obriga o dispositivo a possuir um detetor de passagem por zero (*zero-crossing*). Para a interpretação do *zero-crossing* e respetiva ação, foi necessário o uso de um microcontrolador devido ao xBee não ser programável. Neste esquema o xBee, é apenas usado como módulo de comunicação do microcontrolador. A lista detalhada de componentes eletrónicos do esquema da Figura 22 encontra-se no Anexo B.

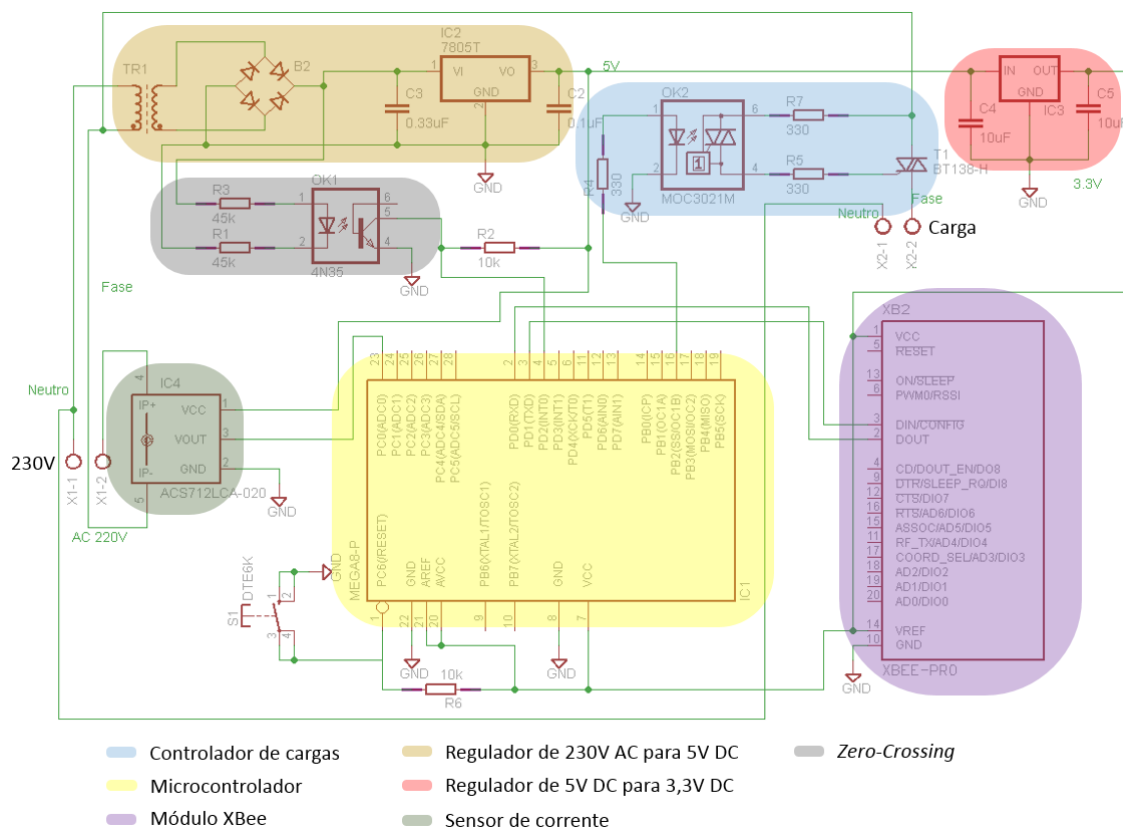


Figura 22 – Esquema eletrónico do dispositivo

3.2.5 Otimizações

Em ambiente *Smart Grid*, torna-se por vezes necessário que os consumidores alterarem o seu padrão de consumos de forma a adaptarem-se às circunstâncias da rede. Esta adaptação poderá ser efetuada manualmente pelo utilizador, o que obrigará o acompanhamento contínuo do utilizador sobre a sua instalação. Outra abordagem inclui a introdução de inteligência na instalação para que esta tenha a capacidade de efetuar otimizações, tendo em conta o cenário real e as exigências pedidas. O uso de otimizações fornece ao pequeno e médio consumidor a capacidade de automação ideal para o ambiente de *Smart Grid*.

O trabalho descrito neste documento possui um núcleo de otimização que se encontra representado na Figura 23. Este núcleo encontra-se desenvolvido em MATLAB e GAMS. O módulo de Otimização presente na Figura 23 já se encontrava desenvolvido, encontrando-se descrito em [Fernandes, 2011]. Neste trabalho, foi apenas utilizada a otimização determinística, já desenvolvida, com a função objetivo (1).

$$\text{Minimize } f = \text{Min} \left[\sum_{Carga=1}^{NCarga} \lambda_{Carga} \times P_{Carga} + \lambda_{Baixa} \times Reg_{Baixa} + \lambda_{Alta} \times Reg_{Alta} \right] \quad (1)$$

Na Figura 23 estão ainda representadas as ANN que permitem atribuir inteligência às otimizações efetuadas. A ANN implementada aprende segundo as ações passadas dos utilizadores. Estas serão abordadas de uma forma exaustiva na secção 3.4. A otimização é efetuada tendo em conta três parâmetros de entrada: o limite de consumo que se pretende atingir; a informação das cargas, estado e consumo atual; e a preferência de cada carga. As preferências das cargas indicam a preferência que os utilizadores têm sobre aquela carga específica. Pegando nas variáveis ambientais do pequeno e médio consumidor, a ANN consegue produzir as preferências mais indicadas para cada carga.

O trabalho conta atualmente com três tipos de otimização: instantânea; por *Offset*; e contínua. Apesar de as três usarem o mesmo núcleo de otimização, elas produzem resultados diferentes. A Otimização Instantânea (Figura 24) apenas se limita a executar o núcleo de otimização e de seguida aplicar o seu resultado nas cargas do pequeno e médio consumidor, ou seja, este tipo de otimização não contém qualquer acompanhamento de consumos pois apenas atua na hora da ordem.

A Otimização por *Offset* (Figura 25) parte do conceito da Otimização Instantânea, a diferença é a continuidade que a Otimização por *Offset* tem no pequeno e médio consumidor. Após a otimização inicial, a Otimização por *Offset* vai escutar as alterações efetuadas pelo utilizador. Se o utilizador ligar uma carga, essa carga é guardada de modo a não entrar na próxima otimização. De seguida, o algoritmo vai observar se o consumo da instalação ultrapassou o limite (*Offset*). Caso tenha ultrapassado o limite, então a otimização volta a correr, mas devido às alterações do utilizador terem sido guardadas, a carga ligada pelo utilizador não será desligada nas próximas otimizações. Este algoritmo encontra-se em permanente escuta de

cargas que são ligadas, controlando sempre o consumo geral de modo a este não ultrapassar o limite imposto.

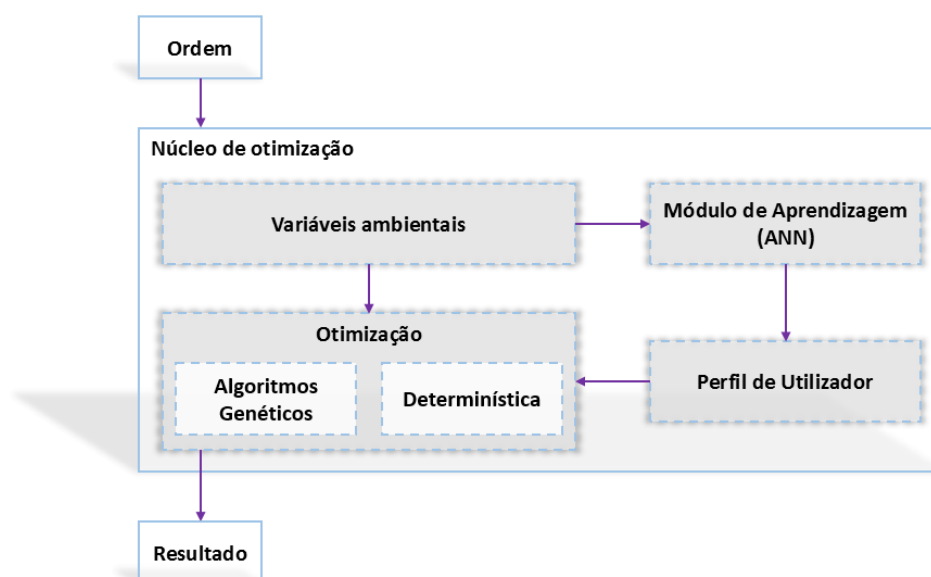


Figura 23 – Núcleo de Otimização



Figura 24 – Otimização Instantânea

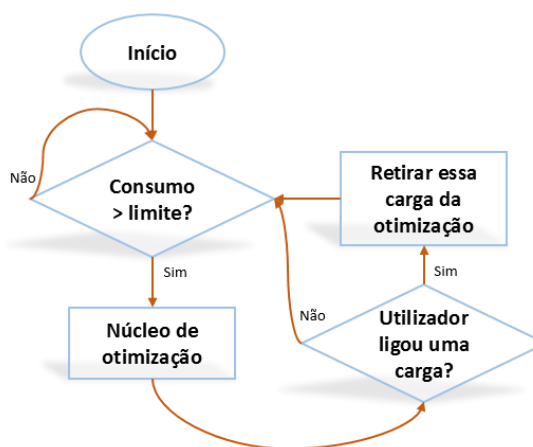


Figura 25 – Otimização por *Offset*

A terceira otimização do sistema usa o mesmo núcleo de otimização. A Otimização Contínua (Figura 26) efetua o acompanhamento das cargas e lida com cargas que não podem ser interrompidas. Para a execução deste algoritmo, as cargas têm que conter dois valores informativos: uma *flag* que indica se a carga pode ser interrompida pela otimização a meio do seu consumo; e outra *flag* que indica se a carga pode retomar a sua execução após ter sido interrompida pela otimização. Com estes dados, a Otimização Contínua apenas desliga as cargas que podem ser interrompidas, deixando cargas como máquinas de lavar a funcionar. No caso de o consumo ser superior ao limite, este tipo de otimização tem o mesmo funcionamento que a Otimização por *Offset*. A única diferença é que após cada otimização, o algoritmo guarda as

cargas que desligou nessa otimização. No caso de o consumo geral ser inferior ao limite imposto, o algoritmo vai percorrer as cargas previamente desligadas e vai identificar se há alguma carga que pode ser ligada novamente. Este processo permite que a Otimização Contínua acompanhe ao longo do tempo o consumo do utilizador de uma forma eficaz.

A otimização em MATLAB e GAMS maximiza o consumo dentro do limite imposto. Isto pode trazer problemas devido à otimização poder desligar uma carga de menor consumo, mas com elevada preferência para ligar uma carga de maior consumo com uma menor preferência, de modo a maximizar o consumo dentro do limite imposto. Este fator da otimização terá que ser reconfigurado a nível programático de forma a maximizar o conforto do utilizador e de seguida maximizar o consumo e não o contrario como atualmente prevalece.

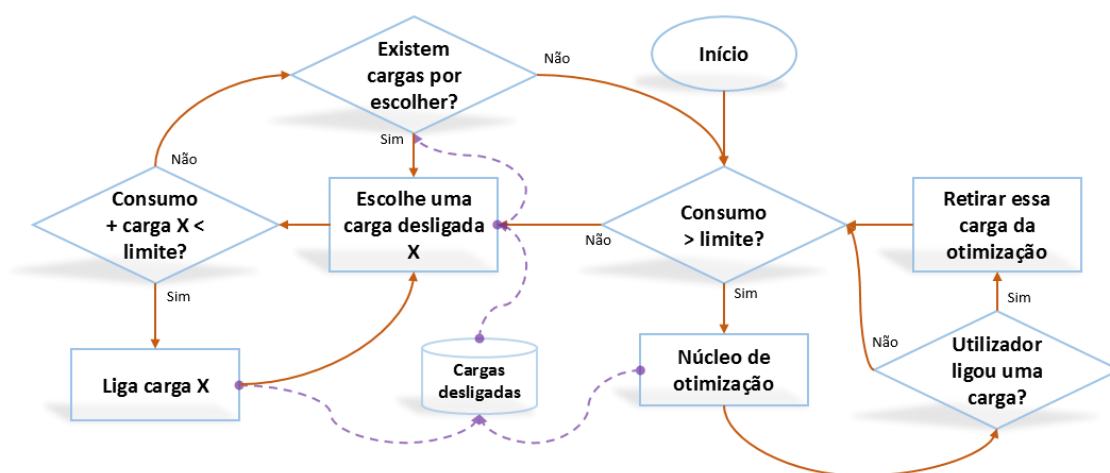


Figura 26 – Otimização Contínua

3.2.6 Interface

Na secção 3.2.3 foi mencionado que nenhum agente do MAS possui uma interface que permita o manusear da informação dos agentes, todos os agentes contêm interfaces de monitorização, mas que não permitem a interação com os utilizadores do sistema. A única exceção existente é a Interface de Controlo no simulador em Java, que permite apenas a alteração de valores ambientais e ocupacionais no pequeno e médio consumidor.

No entanto, especialmente no simulador que representa o agente instalação (*AgentFacility*), a necessidade de uma interface completa que permita controlar todos os parâmetros do pequeno e médio consumidor, torna-se importante. Deste modo foi fundamental o desenvolvimento e implementação de uma agente externo (secção 3.1.3) que interagisse com o agente instalação de forma a produzir os efeitos desejados.

A opção de nenhum agente conter uma interface permite a implementação de interfaces distintas a serem aplicadas nos agentes. Assim sendo, e com base no exemplo do *AgentFacility*, é possível conter várias interfaces em vários formatos e dispositivos que sejam capazes de

monitorizar e controlar o pequeno e médio consumidor. Na totalidade desta dissertação foram desenvolvidas três interfaces distintas para o *AgentFacility*:

- *Interface de PC* – esta interface foi implementada em C# usando o subsistema gráfico WPF da Microsoft, tinha como objetivo a monitorização e controlo de cargas do simulador em C#, permitindo ainda a execução de otimizações e a receção de avisos referentes à *Smart Grid* e a programas de *demand response*;
- *Interface móvel para telemóvel* – foi a segunda interface a ser desenvolvida e destinava-se a telemóveis que corresse o sistema operativo Android, as suas funcionalidades eram as mesmas que a Interface de PC;
- *Interface móvel para tablet* – esta foi não só a última interface, mas como também foi a mais elaborada e complexa a ser desenvolvida, destina-se a *tablets* com o sistema operativo Android (secção 3.3).

Todas as interfaces implementadas no âmbito desta dissertação partilham de uma particularidade – todas elas são dinâmicas no redesenhar das interfaces. A caracterização da instalação é fornecida pelo agente *AgentFacility*, cabendo à interface redesenhar-se de forma a espelhar a instalação do pequeno e médio consumidor.

3.3 Sistema Móvel

O sistema móvel desenvolvido tem como objetivo a implementação de um agente externo que permita o manusear das componentes do agente instalação (*AgentFacility*). A interface deste agente externo foi desenvolvida em Java para poder ser executada em sistemas operativos Android. A comunicação entre o sistema móvel e o *AgentFacility* é concretizada por *sockets* informáticos que criam uma ligação TCP/IP entre dois pontos.

3.3.1 Funcionalidades

Na secção 3.2.3 foi descrito que o simulador em Java pode ser executado livremente sem a necessidade de integração num MAS. Esta funcionalidade aliada ao controlo, que o simulador permite sobre cargas reais numa instalação, possibilita que o sistema seja aplicado noutra área que não a previamente idealizada.

O simulador pode ser portátil para habitações reais onde se pretenda aplicar domótica, transformando-o num sistema SCADA. A combinação entre o simulador, PLC e os dispositivos apresentados na secção 3.2.4, permitem que o sistema possa ser integrado em qualquer pequeno e médio consumidor e atribuir-lhe inteligência e autonomia. A aplicação do sistema numa instalação real traz vantagens sobre a maior gama de equipamentos SCADA, atualmente no mercado, devido à sua instalação não invasiva. O uso dos dispositivos ZigBee não obriga a que se efetuem alterações estruturais à instalação. Um exemplo de aplicabilidade do sistema SCADA encontra-se representado na Figura 27.

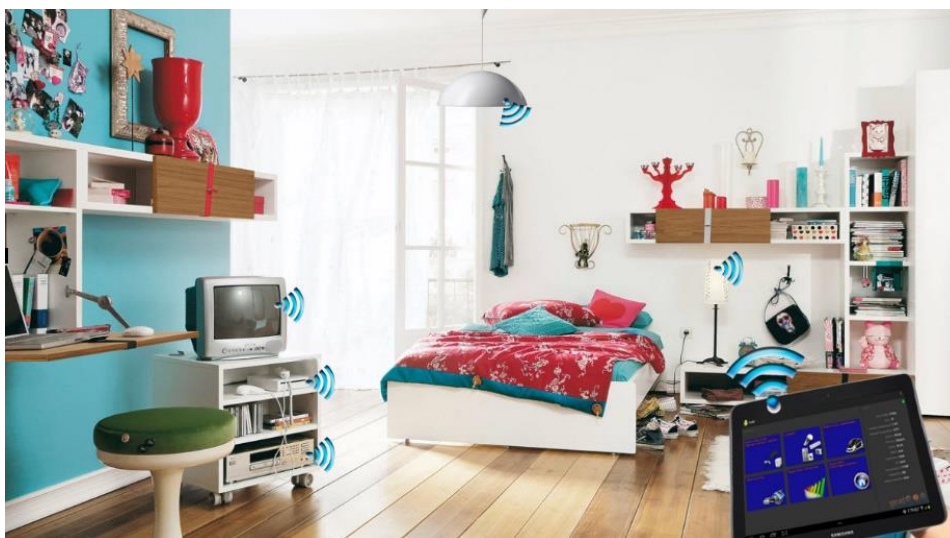


Figura 27 – Simulador Java aplicado, como sistema SCADA, numa instalação

Porém, para executar o simulador como um sistema SCADA, foi necessário desenvolver uma interface que se encontra à altura do desafio. A interface teria de responder aos requisitos dos utilizadores que usam o sistema como um simulador, e aos requisitos dos utilizadores que usam-no como um sistema SCADA. Desta forma optou-se pela implementação de uma interface que fosse executada em sistemas operativos Android.

Um dos critérios de desenvolvimento era a dinamização da interface de modo a abranger qualquer tipo de instalação. Para tal, a interface só é desenhada após uma troca inicial de informação entre a interface e o SCADA/simulador. Assim, é possível, com a mesma interface, a visualização de habitações diferentes a nível estrutural como: número e nome de divisões; o número, nome e tipo de cargas em cada divisão. Para isto ser possível, toda a interface é desenhada por código durante a execução da mesma, mecanismos como aplicação de *scrolls* foram implementados e testados de forma a eliminar erros de interface em casos extremos (como uma instalação com 30 divisões).

A comunicação por *sockets* entre a interface e o SCADA/simulador inicia-se pela identificação de ambas as partes. De seguida, a aplicação pede informação referente às infraestruturas, ambiente e ocupação da instalação. Com esta informação a interface auto constrói-se de forma a se enquadrar com a instalação que vai representar. Posteriormente, a interface pede ainda informação referente a dados estatísticos sobre o pequeno e médio consumidor, representado na instalação, como é o caso dos consumos e preços de energia aplicados nas últimas 24 horas. Esta troca de informação acontece no ato da ligação entre a aplicação e o SCADA/simulador. Após a conclusão destas comunicações, as trocas de informação apenas acontecem caso exista alterações a relatar (alterações provenientes do SCADA/simulador ou alterações que o utilizador efetuou na aplicação da interface).

Tanto os botões como os objetos da interface foram criados especificamente para a interface desenvolvida. Para tal, foram desenvolvidos *layouts* específicos para produzir o resultado final da interface. Foi ainda aplicada uma animação visual para identificar que a aplicação não se

encontra conectada ao SCADA/simulador. Os princípios da programação Android foram todos tidos em conta de forma a não comprometer o bom funcionamento da aplicação.

3.3.2 Interface

A nível visual, a interface segue um veio comum, tendo para isso duas secções diferentes. O lado direito da interface é permanentemente visível, alertando o utilizador para a situação geral do pequeno e médio consumidor. Estes dados são apenas para visualização e não permitem qualquer edição. O lado esquerdo da interface é a secção que mostra o menu onde o utilizador se encontra. A Figura 28 e a Figura 29 demonstram a interface móvel implementada.

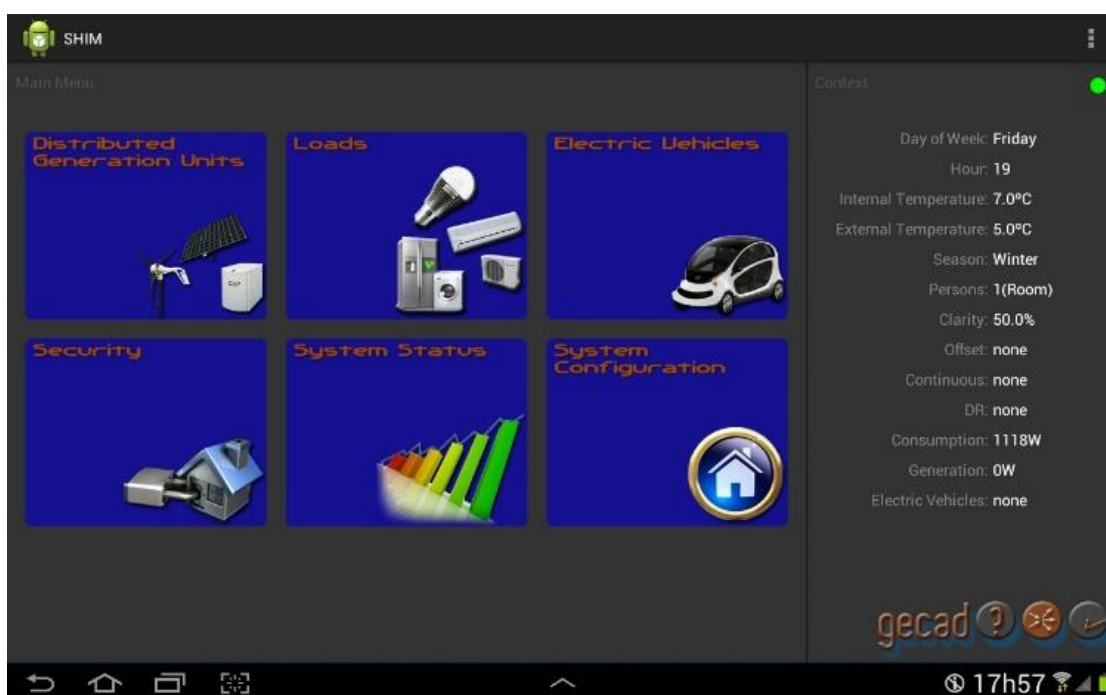


Figura 28 – Interface móvel: menu principal

A Figura 28 mostra o menu principal da aplicação. Aqui podemos ver a divisão do sistema nas oito secções existentes: produção distribuída; cargas; veículos elétricos; painel de segurança; estatísticas do sistema; e a configuração do sistema. Algumas destas secções encontram-se por desenvolver, tendo sido apenas planeadas e estruturadas.

A Figura 29 demonstra o menu da divisão Arrumos (o nome do menu é visível no canto superior esquerdo). As cargas encontram-se listadas dentro de um *scroll*. Cada carga possui o evento *onclicklistener* que permite que esta seja ligada ou desligada por ordem do utilizador. As cargas centrais da Figura 29 (*Air Conditioner 1*, *Air Conditioner 2* e *Air Conditioner 3*) representam os aparelhos de ar-condicionado do pequeno e médio consumidor. Estas cargas são variáveis, permitindo ao utilizador definir o fluxo de potência que a carga pode consumir. Esta variação pode ser efetuada pelo utilizador, recorrendo à *seekbar* (componente azul em baixo do botão da carga).



Figura 29 – Interface móvel: menu de divisão

3.4 Aprendizagem de Preferências e Previsão de Consumos

Esta dissertação tinha o objetivo de dinamizar a otimização para que esta integrasse aprendizagem de cenários. As ANN foram usadas como modo de aprendizagem através de experiências passadas. As ANN foram implementadas usando a Neural Network Toolbox do MATLAB. As ANN são do tipo *feed forward* contendo apenas uma camada intermédia de 77 nós (o valor de nós foi encontrado segundo testes à ANN). Para o treino da ANN é usado o algoritmo de Levenberg–Marquardt. Este algoritmo encontra-se incorporado na Neural Network Toolbox do MATLAB e efetua um treino de *back propagation* na rede.

3.4.1 Configuração das Redes Neurais Artificiais

A ANN usada, esquematizada na Figura 30, contém como dados de entrada: a estação do ano, dia da semana, hora do dia e temperatura sentida; como camada intermédia a ANN contém 77 nós; e como saída a ANN contém valores específicos para cada carga do sistema (sendo que neste caso a saída da ANN é composta por 18 nós devido à existência de 18 cargas).

A ANN é inicialmente treinada com informação previamente armazenada num ficheiro Excel. Este Excel contém diversos cenários com as respetivas preferências do utilizador, para cada carga existente no pequeno e médio consumidor. Ao analisar este ficheiro, a ANN consegue definir os seus pesos de ligação de forma a estes transcreverem a aprendizagem efetuada.

O núcleo de otimização possui duas ANN em vez de uma única. Esta distinção refere-se ao facto de uma ANN ser aplicada aos dias da semana (de segunda a sexta-feira), e a outra ANN ser aplicada aos fins de semana. Optou-se pela separação entre a semana e o fim de semana devido à diferença que estes dois espaços temporais têm em termos de consumo energético em habitações.

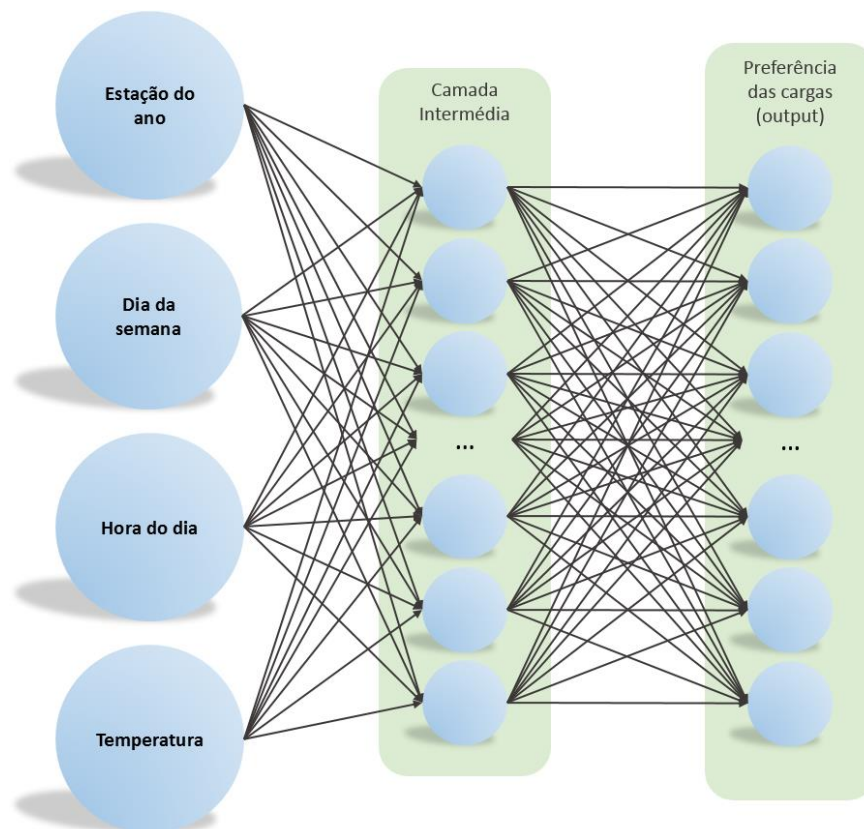


Figura 30 – Esquemática da ANN usada

3.4.2 Aprendizagem

A aprendizagem contínua das ANN recai nas alterações que os utilizadores da instalação, efetuam após uma otimização. Se após uma otimização o utilizador necessitar de ligar uma carga que a otimização desligou, significa que a otimização requer afinações. Todas as alterações provocadas pelos utilizadores após a ocorrência de uma otimização são armazenadas pelo sistema. As ANN sofrem um novo treino a cada fim de ciclo (fim da semana ou fim do fim de semana).

As alterações efetuadas, pelos utilizadores, após as otimizações são guardadas no ficheiro Excel que treinou inicialmente a ANN. O sistema encontra o cenário de ocorrência no Excel e altera o valor de preferência da carga a que o utilizador efetuou a mudança de estado. A alteração de valor de preferência resulta da aplicação das fórmulas (2) e (3). As fórmulas usam a preferência atual da carga (PA) e são aplicadas nas alteração efetuadas, quando a carga é ligada (T_{On}) ou desligada (T_{Off})

$$T_{On} = PA + \frac{(1 - PA)}{(1 + e^{-(2x-6)})} \quad (2)$$

$$T_{Off} = PA - \frac{PA}{(1 + e^{-(2x-6)})} \quad (3)$$

De modo a evitar irregularidades na instalação, as fórmulas (2) e (3) usam a distribuição de uma sigmoide de forma às primeiras ações não terem demasiado impacto na aprendizagem da ANN. A fórmula (2) é aplicada a cargas que sejam ligadas após a otimização (cargas estas que tenham sido desligadas pela otimização). Já a fórmula (3) é aplicada apenas a cargas que sejam desligadas após a otimização.

As alterações são apenas guardadas no sistema se refletirem uma intensão contrária ao resultado da otimização executada. Caso estas ações aconteçam, as preferências das cargas têm que se alteradas de modo a se adaptarem aos gostos dos utilizadores. As linhas verdes da Figura 31 e Figura 32 representam a preferência inicial da carga (zero alterações) enquanto as linhas azuis representam os valores das preferências após x alterações (eixo dos yy). Na Figura 33 e Figura 34 as linhas pretas representam o momento quando a ação dos utilizadores é coerente com o resultado da otimização enquanto as linhas azuis e vermelhas representam os valores das preferências após x alterações (eixo dos yy), as linhas azuis representação ações em que os utilizadores ligaram a carga e as linhas vermelhas representam ações em que os utilizadores desligaram a carga.

A Figura 31 e a Figura 32 são representações da aplicação da formulas (2) e (3). Se uma carga com uma preferência inicial de 0,2 (Figura 31) for desligada na otimização e o utilizador a ligar, esta ação fica registada no sistema e a preferência da carga sobe segundo o número de alterações efetuadas pelo utilizador. A Figura 32 representa uma carga que se manteve ligada após a otimização mas que o utilizador prefere desligá-la. Se esta ação for executada por três vezes seguidas a carga, que antigamente tinha uma preferência de 0,8, fica com uma preferência de 0,4.

No caso de haverem alterações diferentes sobre a mesma carga, a aplicação das fórmulas (2) e (3) aplicam-se. A Figura 33 e a Figura 34 representam dois exemplos dessa situação. A azul encontra-se os valores resultantes da aplicação da fórmula (2), enquanto que a vermelho se encontram os valores resultantes da fórmula (3). Nos exemplos é possível visualizar que a primeira alteração efetuada quase não tem impacto, devido a poder ter ocorrido por erro; já as seguintes provocam um impacto considerável na preferência da carga. Os novos valores de preferência serão depois usados para futuros treinos da ANN, permitindo assim a capacidade de aprendizagem da mesma.

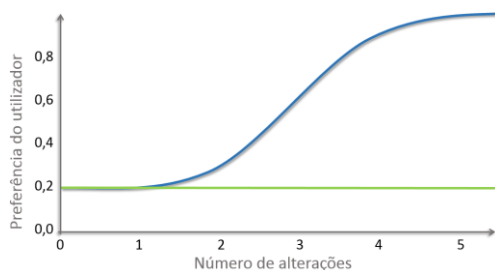


Figura 31 – Equação (2) aplicada a uma carga com uma preferência inicial de 0,2

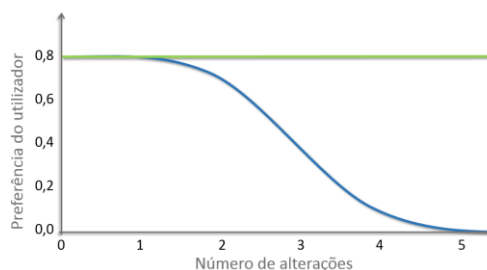


Figura 32 – Equação (3) aplicada a uma carga com uma preferência inicial de 0,8

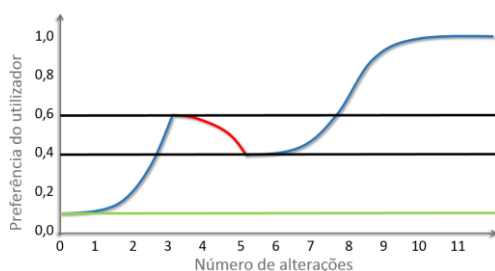


Figura 33 – Exemplo 1 de uma carga que sofreu alterações consecutivas

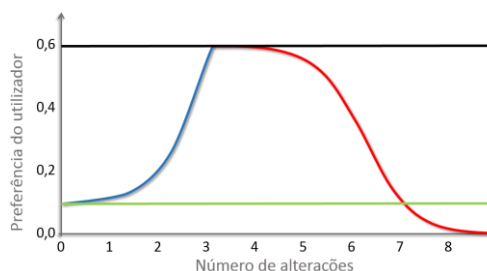


Figura 34 – Exemplo 2 de uma carga que sofreu alterações consecutivas

3.4.3 Previsão de Consumo para o Dia Seguinte

No decorrer do trabalho foram retirados consumos de habitações reais de pequena dimensão. A recolha de dados, foi completada com informação referente ao *heat index* (correlação entre temperatura e humidade), o número de minutos de exposição solar diária e a indicação de pessoas nas instalações durante o período total do dia.

Aproveitando os benefícios das ANN e os dados obtidos nas leituras, foi criada uma ANN que fosse capaz de produzir previsões horárias para o dia seguinte. A ANN usada para efetuar estas previsões possui a mesma configuração descrita no início da secção 3.4.1. O ficheiro de treino da rede possui 75 dias de leituras efetuadas. A ANN tem como *input* o *head index*, número de minutos de exposição solar e a indicação da presença permanente de pessoas para o dia seguinte. O *output* desta é a previsão horária de consumos para o dia seguinte.

4 Casos de Estudo

Este capítulo apresenta os casos de estudo efetuados ao sistema GAIC (capítulo 3). Todos os casos de estudo têm como objetivo o teste do GAIC e as suas funcionalidades e foram escolhidos de modo a comprovar a consistência e utilidade do GAIC.

4.1 Dinamismo da Interface Móvel

O primeiro caso de estudo demonstra o dinamismo da aplicação móvel desenvolvida nesta dissertação. A configuração das divisões e cargas é efetuada pelo administrador no simulador. Assim, a interface da aplicação móvel teve de implementar mecanismos dinâmicos capazes de suportar as configurações do simulador.

A Figura 35 e a Figura 36 são capturas de ecrã da mesma aplicação móvel desenvolvida neste trabalho. A única diferença entre as imagens é a configuração efetuada no simulador. Aquando da ligação com o simulador, a aplicação móvel desenha a sua interface consoante as configurações efetuadas pelo administrador.



Figura 35 – Divisão constituída por poucas cargas



Figura 36 – Divisão constituída por diversas cargas

4.2 Otimizações Contextualizadas

As otimizações permitidas pelo GAIC possuem vantagens quando aplicadas ao consumo geral da instalação. Contudo, estas só são benéficas para o utilizador se, de facto, se demonstrar que elas se adequam ao ambiente externo da instalação. Este caso de estudo vem demonstrar o uso de otimizações para vários cenários semelhantes, observando a adequação das otimizações para os contextos de cada cenário. Este caso de estudo foi publicado em [Gomes, 2013].

O caso de estudo será subdividido em três cenários em que será aplicada uma otimização no interior de uma habitação. Dentro de cada cenário existe um mínimo de duas simulações, onde a posição das pessoas é alterada de forma a ver o impacto gerado na otimização. A Tabela 2 demonstra sete simulações, as simulações I e II compõem o primeiro cenário, as simulações III e IV compõem o segundo cenário e por último as simulações V, VI e VII compõem o terceiro cenário simulado.

A Figura 37 contém a distribuição de consumos segundo as divisões e os tipos de equipamentos. As primeiras duas colunas de cada cenário possuem o consumo antes de a otimização ser aplicada; as restantes barras do gráfico demonstram os resultados da otimização tendo em conta as divisões das cargas e o seu tipo.

O algoritmo de otimização usado foi o de Otimização Instantânea (secção 3.2.5). Observando a Tabela 2 poder-se-á verificar que as otimizações executadas cumprem os limites impostos. No entanto, não é possível observar se estas otimizações se enquadram com o contexto do cenário.

Tabela 2 – Caracterização das otimizações contextualizadas

	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>
Temperatura (° C)	23	23	7	7	-10	-10	-10
Luminosidade (%)	70	70	5	5	0	0	0
Estação do ano	Verão	Verão	Inverno	Inverno	Inverno	Inverno	Inverno
Dia	Segunda-feira	Segunda-feira	Quarta-feira	Quarta-feira	Sexta-feira	Sexta-feira	Sexta-feira
Hora	12h00	12h00	19h00	19h00	20h00	20h00	20h00
Pessoas	0	1 (Cozinha)	1 (Sala)	2 (Sala, Cozinha)	0	2 (2xQuarto)	3 (2xSala, Cozinha)
Consumo (W)	4544	4544	2906	2836	3066	3076	3086
Preço da energia (EUR/kWh)	0.15	0.15	0.18	0.18	0.16	0.16	0.16
Limite (W)	2500	2500	2000	2000	2500	2500	2500
Consumo após otimização (W)	2474	2538	1990	1998	2420	2408	2550

No primeiro cenário, a primeira simulação desliga diversas cargas na cozinha. Contudo, na segunda simulação, essas cargas mantêm-se ligadas devido à presença física de um utilizador naquela divisão. Nas simulações do último cenário é visível que os equipamentos de HVAC²² possuem sempre uma componente no consumo geral, devendo-se ao facto de as temperaturas assim o justificarem. Mesmo com a presença significativa de pessoas na instalação, a otimização nunca desliga totalmente este tipo de equipamentos.

O caso de estudo aqui presente pretende demonstrar a flexibilidade e adaptação do GAIC ao cenário contextual dos pequenos e médios consumidores. Na ótica dos consumidores a adaptação do sistema é um aspeto fundamental de modo a diminuir os impactos negativos. Porém, a adaptação por si só não é o suficiente, tendo de ser deliberada com os parâmetros contextuais corretos. De modo a comprovar a qualidade de adaptação inerente ao GAIC e consequentes otimizações desenvolvidas neste trabalho, o caso de estudo aqui apresentado usa três cenários contextualmente distintos de forma a expor as diferentes reações do GAIC.

²² Heating, Ventilation, and Air Conditioning

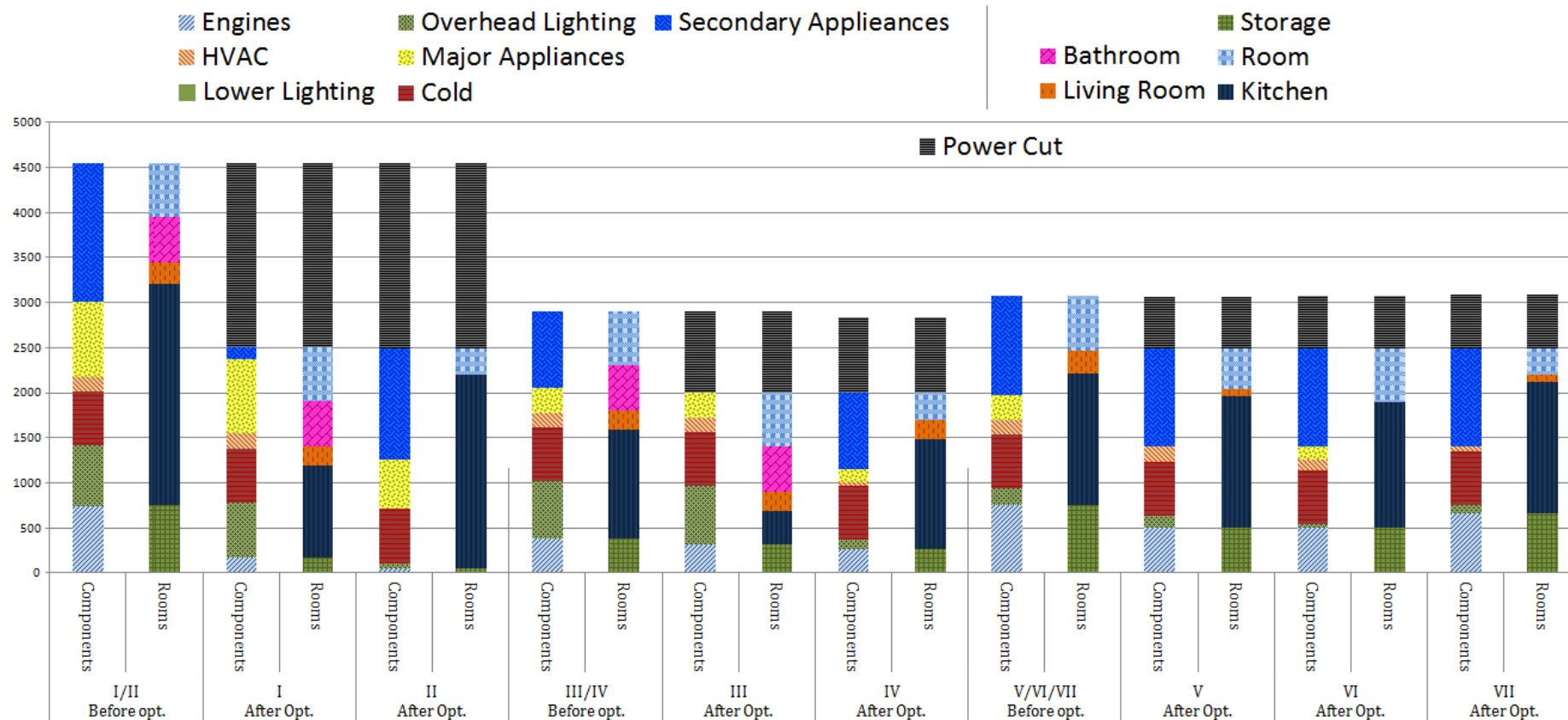


Figura 37 – Resultados das otimizações segundo o tipo de cargas e a divisões

4.3 Aprendizagem das ANN

O caso de estudo aqui apresentado encontra-se publicado em [Gomes, 2011]. Este caso de estudo propõem mostrar a aprendizagem das ANN segundo as ações efetuadas pelos utilizadores da instalação aplicando, para tal, os mecanismos de aprendizagem descritos na secção 3.4.2. O pequeno e médio consumidor simulado neste teste possui as cargas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Cargas da simulação de aprendizagem

<i>Cargas</i>	<i>Tipo</i>	<i>ID</i>	<i>Consumo Máximo (W)</i>
Motor de Indução 1	Variável	V1	90
Motor de Indução 2	Variável	V2	200
Motor de Indução 3	Variável	V3	300
Lâmpada Fluorescente	Variável	V4	18
Lâmpada Incandescente	Discreta	F1	30
Lâmpada Compacta	Discreta	F2	30
Acumulador de Calor 1	Discreta	F3	40
Acumulador de Calor 2	Discreta	F4	120
Lâmpada de Halogéneo	Discreta	F5	500
Exaustor	Discreta	F6	138
Frigorífico 1	Discreta	F7	300
Máquina de Lavar Roupa	Discreta	F8	550
Televisão 1	Discreta	F9	138
Frigorífico 2	Discreta	F10	300
Micro-ondas	Discreta	F11	550
Televisão 2	Discreta	F12	138
Chaleira	Discreta	F13	300
Máquina de Lavar Loiça	Discreta	F14	550
Total (W)			4292

O caso de estudo aqui descrito ocorre durante cinco fins de semana consecutivos em que é aplicado um limite máximo de consumo de 2kW. A Tabela 4 contém a caracterização do contexto presente caso de estudo. A otimização utilizada foi a Otimização Instantânea (descrita no secção 3.2.5), antes da otimização todas as cargas encontravam-se ligadas e a consumir o máximo de potência.

Tabela 4 – Caracterização do caso de estudo

Hora	9:00
Dia	Sábado e Domingo
Estação do ano	Verão
Temperatura	15°C
Limite de consumo	2kW

Os resultados obtidos pelas otimizações efetuadas aos sábados podem ser observados na Tabela 5. Aqui podemos não só ver os resultados, como também as preferências individuais de cada carga existente na simulação. Tal como já foi visto, as preferências das cargas definem a preferência que os utilizadores da instalação possuem sobre a carga.

Tabela 5 – Aprendizagem da ANN (Sábado)

ID	<i>Sábado de Verão (09:00)</i>									
	Primeiro Sábado		Segundo Sábado		Terceiro Sábado		Quarto Sábado		Quinto Sábado	
	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)
V1	0,7	90	0,7	90	0,7	90	0,7	90	0,7	90
V2	0,5	200	0,5	200	0,5	200	0,5	200	0,5	200
V3	0,7	300	0,7	300	0,7	300	0,7	300	0,7	300
V4	0,1	60	0,1	60	0,1	50	0,1	10	0,1	50
F1	0,1	30	0,1	30	0,1	0	0,1	30	0,1	0
F2	0,1	30	0,1	30	0,1	30	0,1	30	0,1	30
F3	0	0	0	0	0,1	40	0,1	40	0,1	40
F4	0	0	0	0	0,1	0	0,5	0	0,9	120
F5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F6	0	0	0	0	0,1	0	0,5	0	0,9	138
F7	0,5	300	0,5	300	0,5	300	0,5	300	0,5	300
F8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F10	0,7	300	0,7	300	0,7	300	0,7	300	0,7	300
F11	0,2	550	0,2	550	0,3	550	0,6	550	0,6	0
F12	0,6	138	0,6	138	0,6	138	0,6	138	0,6	138
F13	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,2	300
F14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1998		1998		1998		1988		2006	

Na execução da otimização durante o primeiro sábado, as cargas F3, F4 e F6 são desligadas. Porém, o utilizador discorda dessa ação e liga-as manualmente (retângulo a verde). Esta ação faz com que o GAIC armazene essa preferência e aplique aprendizagem à ANN usada para obter as preferências das cargas. Tal como foi verificado na secção 3.4.2, a aprendizagem segue uma função sigmoide de maneira a não provocar demasiado impacto após a primeira alteração efetuada pelo utilizador. Desta forma, pode-se observar que no segundo sábado as mesmas cargas são novamente desligadas pela otimização e ligadas pelo utilizador.

Na execução da otimização no terceiro sábado, a carga F3 já se mantém ligada. Neste sábado os utilizadores da instalação continuam a preferir ligar as cargas F4 e F6 após a otimização. A carga F1 também é ligada, mas apenas é uma decisão momentânea que não se irá repetir. No quarto sábado, a carga F1 não sofre alterações devido à sigmoide prevenir a aprendizagem de decisões momentâneas. As cargas F4 e F6 acabam por ser ligadas no quinto sábado. Esta demora deve-se ao consumo elevado que estas possuem quando comparadas com a carga F3 que conseguiu ser ligada logo no terceiro sábado.

A Tabela 6 possui os resultados experienciados durante os domingos dos cinco fins de semana testados. A verde é possível observar as cargas que os utilizadores ligaram após as otimizações. O procedimento da aprendizagem reflete o experienciado nos sábados. A preto encontram-se as cargas que, após a otimização, foram desligadas pelos utilizadores. Estas ações provocaram uma aprendizagem no GAIC que resultou, no quinto domingo, no desligar parcial ou total das cargas V1 e V3 respetivamente.

Tabela 6 – Aprendizagem da ANN (Domingo)

ID	<i>Domingo de Verão (09:00)</i>									
	Primeiro Domingo		Segundo Domingo		Terceiro Domingo		Quarto Domingo		Quinto Domingo	
	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)	Preferência de Cargas	Consumo (W)
V1	0,7	90	0,7	90	0,6	90	0,4	90	0,1	30
V2	0,5	200	0,5	200	0,5	200	0,5	200	0,5	180
V3	0,7	300	0,7	300	0,6	300	0,4	210	0,1	0
V4	0,1	60	0,1	60	0,1	60	0,1	0	0,1	0
F1	0,1	30	0,1	30	0,1	30	0,1	0	0,1	0
F2	0,1	30	0,1	30	0,1	30	0,1	0	0,1	0
F3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F5	0	0	0	0	0,1	0	0,5	500	0,5	500
F6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F7	0,5	300	0,5	300	0,5	300	0,5	300	0,5	300
F8	0	0	0	0	0,1	0	0,5	550	0,5	550
F9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F10	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,3	300
F11	0,2	550	0,2	550	0,2	550	0,2	0	0,2	0
F12	0,6	138	0,6	138	0,6	138	0,6	138	0,6	138
F13	0,2	300	0,2	300	0,2	300	0,2	0	0,2	0
F14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		1998		1998		1998		1988		1998

Este caso de estudo vem comprovar o poder de aprendizagem existente no sistema GAIC. Esta aprendizagem é fundamental para o aperfeiçoamento das otimizações efetuadas, de modo a estas corresponderem ao perfil e vontade dos utilizadores da instalação.

4.4 Previsão de Consumos

O GAIC integra ainda uma ANN para efetuar previsões de consumo horário durante 24 horas para a instalação. A ANN foi treinada recorrendo a leituras reais, efetuadas durante 75 dias, numa instalação residencial real. Esta ANN encontra-se descrita na secção 3.4.3.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos pela ANN para a previsão de um dia com um *heat index* de 18°C, com 8 horas e 56 minutos de luz solar e sem a presença permanente de pessoas nas instalações. Supondo que estes consumos representam o conforto total dos utilizadores, podemos pegar nestes valores e aplicar o valor mínimo de conforto que o utilizador está

disposto a possuir. Este processo permite-nos definir um limite de consumo para o dia seguinte, levando em consideração o conforto mínimo aceite pelo utilizador.

Tabela 7 – Previsão de consumos para o dia seguinte

<i>Hora</i>	<i>Consumo (W)</i>
00:00	2365
01:00	2454
02:00	2169
03:00	1936
04:00	1924
05:00	1711
06:00	1945
07:00	2290
08:00	1573
09:00	3762
10:00	1491
11:00	1718
12:00	2488
13:00	1524
14:00	1486
15:00	1555
16:00	1413
17:00	1514
18:00	1573
19:00	3194
20:00	2397
21:00	3040
22:00	2391
23:00	1605
24:00	2365

Num pequeno e médio consumidor real, o GAIC pode pegar nestes dados e aconselhar um limite máximo de 1.973W para a instalação, representando uma poupança de 14% nos gastos de energia elétrica. Este valor foi calculado usando a média das 7 horas de maior consumo (existem diariamente 7 horas de elevada procura de energia elétrica na rede). Nesta média, foi aplicado o conforto mínimo dos utilizadores, que neste caso era 70%. Assim sendo, o GAIC pode propor uma redução de custos e aplicar otimizações capazes de manter o pequeno e médio consumidor abaixo do limite imposto, gerando a redução de gastos para o utilizador e aliviando a rede de distribuição durante as horas de elevada procura de energia elétrica.

4.5 Eventos Excepcionais

No dia a dia existem eventos excepcionais, tais como, jantares de negócio ou visitas familiares, que uma aprendizagem constante não consegue prever. Este caso de estudo vem demonstrar a aplicação de um evento excepcional num pequeno ou médio consumidor.

O uso de ANN, como meio de obtenção de preferências do utilizador para efetuar a otimização, mostrou vantagens ao nível da aprendizagem e do ajuste de otimizações aos contextos dos cenários em que o pequeno e médio consumidor se encontra. Contudo, para aplicar este

sistema a habitações futuras tem que ser desenvolvido um sistema de exceções. Só assim é possível a adaptação total do GAIC ao dia a dia dos utilizadores.

Este caso de estudo apenas irá lidar com as preferências das cargas, e não irá efetuar otimizações. O caso de estudo usa uma instalação onde habita um casal, que tem por hábito comprar o jantar de segunda-feira num *take-away* e ir jantar para a sua sala enquanto vê televisão. O dia em estudo é uma segunda-feira de inverno, às 20h00 e com uma temperatura externa entre os 0°C e os 20°C. Neste dia de estudo, os utilizadores relatam ao GAIC que se irá ocorrer um evento excecional nessa noite, sendo que amigos do casal vão à sua residência para fazerem um jantar.

A Tabela 8 contém as cargas usadas neste caso de estudo, assim como as preferências dos utilizadores obtidas para: o momento inicial da implementação do GAIC (quando a ANN se encontra por defeito); o momento em que a ANN se encontra treinada para acomodar os gostos dos utilizadores; e para o momento do evento excecional.

Tabela 8 – Preferências do utilizador resultantes

Cargas		Preferências do utilizador		
Nome	Divisão	Inicial	Aprendidas	Evento excecional
Ar condicionado 1	Arrumos	0,40	0,50	0,50
Ar condicionado 2	Arrumos	0,40	0,50	0,50
Ar condicionado 3	Arrumos	0,40	0,50	0,50
Lâmpada fluorescente	Cozinha	0,70	0,10	0,74
Lâmpada Incandescente	Quarto de banho	0,70	0,70	0,70
Lâmpada compacta	Quarto	0,60	0,40	0,16
Acumulador de calor 1	Sala	0,60	0,60	0,68
Acumulador de calor 2	Quarto	0,60	0,60	0,28
Lâmpada de halogeno	Arrumos	0,40	0,10	0,10
Exaustor	Cozinha	0,50	0,10	0,66
Frigorífico 1	Cozinha	0,30	0,30	0,30
Máquina de lavar roupa	Arrumos	0,20	0,40	0,24
Televisão 1	Sala	0,20	0,70	0,70
Frigorífico 2	Cozinha	0,30	0,30	0,30
Micro-ondas	Cozinha	0,60	0,10	0,66
Televisão 2	Quarto	0,20	0,20	0,12
Iluminação de teto	Sala	0,60	0,80	0,80
Máquina de lavar loiça	Cozinha	0,60	0,60	0,76

As preferências do utilizador resultantes da ANN não atribuem muita relevância aos equipamentos de cozinha. No entanto, durante o evento excecional, é garantida uma maior relevância para estes equipamentos. Para tornar possível a introdução deste tipo de eventos, o sistema apenas terá de conter uma base de dados para eventos especiais onde o utilizador define o evento e as preferências para esse evento. A fórmula (5) demonstra como se obtém as preferências da coluna “Evento excecional” da Tabela 8. O $\lambda_{Excecional}$ representa a preferência resultante da média entre a preferência aprendida pela ANN ($\lambda_{Aprendida}$) e pela preferência do evento especial (λ_{Evento}).

$$\lambda_{Exceccional(carga)} = Média(0,20 \times \lambda_{Aprendida(carga)} + 0,80 \times \lambda_{Evento(carga)}) \quad (5)$$

Aplicando a fórmula (5) às preferências geradas pela ANN (coluna Aprendidas da Tabela 9) e às do “Evento de jantar”, é possível obter novas preferências que levem em conta o evento especial e as preferências normais dos utilizadores. Este caso de estudo vem demonstrar que é possível integrar no GAIC novas metodologias de forma a torna-lo mais flexível e capaz de lidar com funcionalidades que não foram inicialmente previstas.

Tabela 9 – Preferências do evento exceccional

Cargas	Preferências do utilizador		
	Aprendidas	Evento de jantar	Evento exceccional
Ar condicionado 1	0,50	0,50	0,50
Ar condicionado 2	0,50	0,50	0,50
Ar condicionado 3	0,50	0,50	0,50
Lâmpada fluorescente	0,10	0,90	0,74
Lâmpada Incandescente	0,70	0,70	0,70
Lâmpada compacta	0,40	0,10	0,16
Acumulador de calor 1	0,60	0,70	0,68
Acumulador de calor 2	0,60	0,20	0,28
Lâmpada de halogeno	0,10	0,10	0,10
Exaustor	0,10	0,80	0,66
Frigorífico 1	0,30	0,30	0,30
Máquina de lavar roupa	0,40	0,20	0,24
Televisão 1	0,70	0,70	0,70
Frigorífico 2	0,30	0,30	0,30
Micro-ondas	0,10	0,80	0,66
Televisão 2	0,20	0,10	0,12
Iluminação de teto	0,80	0,80	0,80
Máquina de lavar loiça	0,60	0,80	0,76

4.6 RTP

O presente caso de estudo diz respeito à aplicação do programa de DR de Preço em Tempo Real (RTP²³), onde o preço de energia varia consoante a hora diária. O caso de estudo foi aplicado no sistema de agentes descrito da secção 3.1. Contudo, o seu estudo prende-se no agente instalação (secção 3.2) e como este lida com o programa. Este caso de estudo encontra-se em [Gomes, 2014].

A constituição do pequeno e médio consumidor é composta pelas cargas descritas na Tabela 3. A otimização usada neste caso de estudo é a Otimização por *Offset* (secção 3.2.5) onde se define um *Offset* (limite) cujo consumo geral do pequeno e médio consumidor não poderá ultrapassar. Este *Offset* é aplicado ao pequeno e médio consumidor conforme os preços de energia aplicados. A configuração dos *Offsets* pode ser consulta na Tabela 10.

²³ Real-Time Pricing

Os preços da eletricidade são lançados pelo agente ISO, estes preços foram retirados do mercado português e dizem respeito ao dia 21 de fevereiro de 2012. Neste caso de estudo específico serão apenas abordadas as horas entre as 18:10 e as 23:55.

Tabela 10 – Configuração dos *Offsets* segundo o preço de energia elétrica

Condição de Preço (EUR/kWh)		Offset (kW)
Maior ou igual que	Menor que	
-	0,12	Nenhum
0,12	0,14	4,00
0,14	0,16	3,00
0,16	0,18	2,50
0,18	0,20	2,00
0,20	-	1,75

A Figura 38 possui os resultados obtidos com a execução da simulação deste caso de estudo. O gráfico *a)* da Figura 38 mostra-nos os preços executados durante as horas de estudo. Os preços que se encontram a vermelho representam preços que exigem, segundo as configurações existentes, a execução de um *Offset*. Os preços a azul não possuem *Offset* a eles associado.

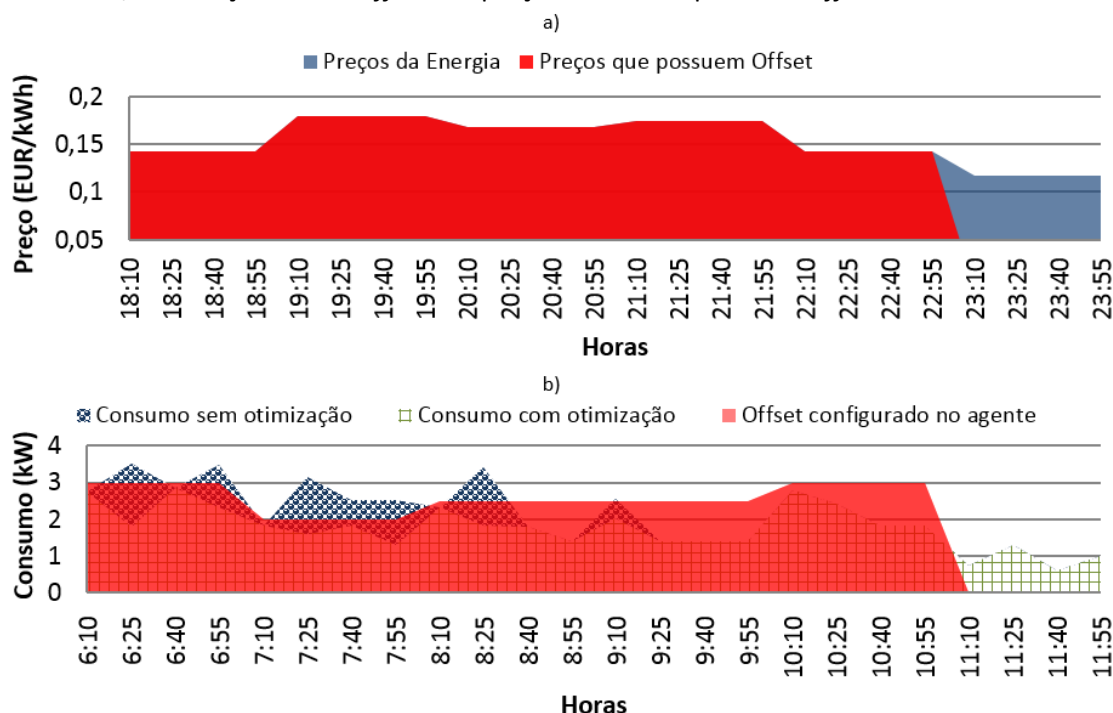


Figura 38 – *a)* Preços de energia; *b)* Consumos

O gráfico *b)* da Figura 38 contém os consumos atingidos durante a simulação. A vermelho pode-se observar o *Offset* que no momento se encontra aplicado ao pequeno e médio consumidor. O menor *Offset* aplicado ocorre durante as 19h00 e possui o valor de 2kW. A azul encontram-se os consumos normais, sem *Offsets*, da instalação para a hora e dia da simulação. A verde encontram-se os consumos com a aplicação do algoritmo de Otimização por *Offset*. Esta otimização é aplicada sempre que se verifica que o *Offset*, determinado pelo utilizador, se encontra inferior ao consumo momentâneo. Sempre que isso aconteça a otimização é

executada como indicado na secção 3.2.5 e mantém os consumos abaixo dos valores de *Offset*, tal como pode ser visualizado no gráfico *b)* da Figura 38.

Este caso de estudo demonstra a capacidade do GAIC manter os consumos de um pequeno e médio consumidor abaixo de um valor previamente estabelecido. Esta funcionalidade que o GAIC possui, permite ao consumidor baixar o seu consumo, evitar horas de preços elevados e gerir cargas tendo em conta fatores externos ao pequeno e médio consumidor.

4.7 RTDRP

Este caso de estudo encontra-se em [Gomes, 2014], e tem como objetivo a implementação do programa de DR RTDRP no MAS do sistema implementado neste trabalho. O programa de RTDRP, tal como visto na secção 2.3, requer a celebração de contratos antes de o evento de corte se iniciar.

Este caso de estudo usa o MAS com 30 consumidores finais, 22 consumidores domésticos e 8 consumidores comerciais. O ISO lança o programa com um mínimo de participação de 100kW. Nos requisitos iniciais o ISO define ainda qual a data em que o corte pode ser exigido, porém, não é previamente conhecida a data nem hora exata. Os consumidores que pretendem celebrar contrato têm de ser capazes de produzir previsões de consumo e definir um corte para formar a proposta.

Os agentes capazes de produzir cortes acima dos 100kW negociam e celebram contratos diretamente com o agente ISO (estes agentes encontram-se assinalados a azul na Tabela 11). Os restantes agentes que não possuam capacidade de corte suficiente, mas que pretendem participar no programa de RTDRP, têm que necessariamente recorrer a um agregador. O agregado deste caso de estudo é um CSP (secção 2.3).

O funcionamento do CSP encontra-se explicado na secção 3.1.1. Este agente terá que aglomerar os consumidores de forma a atingir o mínimo requerido pelo ISO. Para sua salvaguarda, o CSP apenas celebra contratos quando atinge o mínimo de 160% do mínimo requerido pelo ISO. Neste caso de estudo o CSP apenas celebra contratos de um mínimo de 160kW.

Para poderem celebrar contratos com o CSP, os agentes necessitam de indicar a sua capacidade de corte estimada. Para tal a fórmula (4) é aplicada em cada agente, esta fórmula usa os consumos históricos relativos ao ano anterior durante a mesma época, onde o programa de RTDRP será executado. O P_{OnPeak} representa o consumo histórico efetuado nas horas de elevada procura de energia elétrica. Por sua vez, o $P_{MidPeak}$ representa o consumo histórico de média procura de energia elétrica e o $P_{OffPeak}$ representa o consumo histórico efetuado nas horas de menor procura de energia elétrica da rede. A variável $P_{CutPercentage}$ representa a percentagem que o consumidor pretende cortar nos programas de RTDRP. Como o pedido de corte do RTDRP acontece, por norma, nas horas de elevada procura de energia elétrica, a fórmula (4) dá preferência ao histórico de elevada procura de energia elétrica.

$$P_{Contract} = \frac{P_{OnPeak} \times 4 + P_{MidPeak} \times 2 + P_{OffPeak}}{7} \times \frac{P_{CutPercentage}}{100} \times 0.7 \quad (4)$$

A Tabela 11 possui as características dos 30 agentes que compõem o caso de estudo. Recorrendo à fórmula (4) são obtidos os valores de “Capacidade de corte”. Para este caso, todos os agentes tentam participar no programa com a capacidade de corte que possuem. Apenas dois agentes (o 19 e o 24) se encontram em posição para negociar diretamente com o agente ISO. Os outros não possuem o mínimo suficiente para a participação direta e, como tal, procuram estabelecer contratos com o CSP.

O CSP apenas formula um contrato. Os agentes 28, 29 e 30 não entram nesse contrato devido ao CSP não necessitar deles para atingir o seu limite interno de 160% do mínimo requerido pelo ISO. Durante a execução dos cortes, o CSP terá que decidir se participa ou não no evento. Sendo que este só o faz se obtiver 120% do mínimo estabelecido pelo ISO de modo a possuir uma margem de segurança.

No instante do evento de corte, o CSP pede aos agentes, com que possui contrato, três valores de corte: Corte real; Corte adicional; e DLC. O Corte real é o poder de corte normal que o agente pode efetuar sem alterar o nível de conforto atual da instalação. O Corte adicional é o esforço máximo que o agente pode efetuar sem ultrapassar o limite mínimo de conforto estabelecido pelo utilizador. O DLC é o poder de corte das cargas que possuem contratos DLC com o CSP, ou seja, cargas que o CSP pode desligar sem a autorização do utilizador (esta ação envolve custos elevados para o CSP).

Neste caso de estudo o CSP necessita de aplicar o *Corte real + Corte adicional + DLC*. Só assim lhe é possível atingir os 120% do mínimo requerido pelo ISO. O CSP impõem um mínimo de 120% para prevenir incumprimentos dos consumidores e, consequentemente, sanções do ISO. Este caso de estudo vem testar o MAS implementado com a aplicação de um programa de DR, analisando, essencialmente, o processo levado a cabo pelo agente CSP.

Tabela 11 – Resultados do programa de DR RTDRP

Agentes		Consumo histórico médio			Configuração do RTDRP		Contratos	Informação enviada ao CSP		
ID	Tipo*	On-peak (W)	Mid-peak (W)	Off-peak (W)	Percentagem de corte (%)	Capacidade de corte (W)		Corte real (W)	Corte adicional (W)	DLC (W)
1	D	4489	3912	1520	15	410	CSP	410	150	0
2	C	100456	80165	50468	40	24505	CSP	899	342	200
3	D	4856	3562	1676	30	847	CSP	320	0	150
4	D	5132	3465	246	18	499	CSP	0	0	0
5	C	30546	24983	2354	30	5235	CSP	0	0	0
6	D	6542	5132	3645	50	2004	CSP	0	0	0
7	D	4651	3216	925	12	312	CSP	315	26	0
8	C	70468	50468	25987	30	12264	CSP	0	0	0
9	D	4321	3654	3211	32	890	CSP	890	251	0
10	D	8329	6548	3546	20	999	CSP	999	856	0
11	D	7426	5132	2756	15	641	CSP	450	265	0
12	C	230455	200897	165444	50	74453	CSP	64321	5423	2300
13	D	6542	4563	2135	20	749	CSP	0	0	0
14	D	4521	2468	2465	20	510	CSP	500	785	0
15	C	50216	40546	20456	15	4536	CSP	652	3521	210
16	D	5132	3546	1584	10	292	CSP	290	210	0
17	D	3587	2465	1045	20	406	CSP	406	0	0
18	D	7324	5132	3498	25	1076	CSP	890	260	0
19	C	345087	300489	232146	50	110674	ISO	–	–	–
20	D	3549	2468	1548	20	414	CSP	414	32	0
21	D	1358	456	122	5	32	CSP	0	0	0
22	D	6245	4878	3425	35	1336	CSP	1309	350	320
23	D	3456	2468	1897	20	413	CSP	420	652	0
24	C	565218	498252	420465	35	128724	ISO	–	–	–
25	D	5498	4568	3249	20	688	CSP	688	230	0
26	D	4238	3254	3218	15	400	CSP	400	978	0
27	C	160456	100486	30469	40	34931	CSP	29865	890	1500
28	D	6543	4688	2468	30	1140	Nenhum	–	–	–
29	D	5138	3424	1653	15	436	Nenhum	–	–	–
30	D	4235	3218	1532	15	374	Nenhum	–	–	–
* (D – Doméstico / C - Comercial)							Totais	104438	15221	4680
									124339	

4.8 Otimização por *Offset* vs. Otimização Contínua

O GAIC possui dois algoritmos contínuos de otimização (secção 3.2.5). Este caso de estudo pretende efetuar uma comparação entre os dois de modo a visualizar as suas diferenças. O caso de estudo aqui apresentado foi proposto para o 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, estando a aguardar resposta.

Neste caso de estudo será aplicado um limite de consumo de 2kW entre as 19:00 e as 22:00. A Figura 39 mostra (a cor-de-laranja) os consumos normais durante esse tempo sem que estes sejam sujeitos a quaisquer otimizações. Durante a maior parte do tempo os consumos excedem o limite de 2kW. Aplicando a simulação com a Otimização por *Offset*, obtém-se os consumos delimitados pelo traço a vermelho da Figura 39. Devido a este algoritmo apenas proceder ao corte de cargas, ele representa um reflexo do consumo normal, embora aninhado em termo de valores.

O algoritmo de Otimização Contínua é capaz de ligar cargas que outrora foram desligadas pela otimização, o que permite uma maior eficiência no aproveitamento do limite imposto. A aplicação deste algoritmo encontra-se representada a azul na Figura 39, onde é possível visualizar que o consumo global da instalação se manteve mais estável, podendo, assim, tirar mais proveito do limite e garantindo assim um aumento de comunidade ao utilizador.

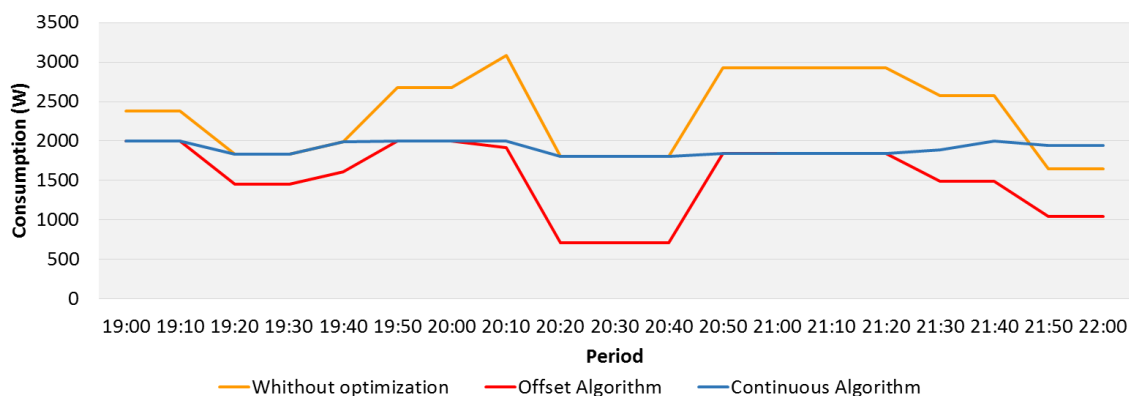
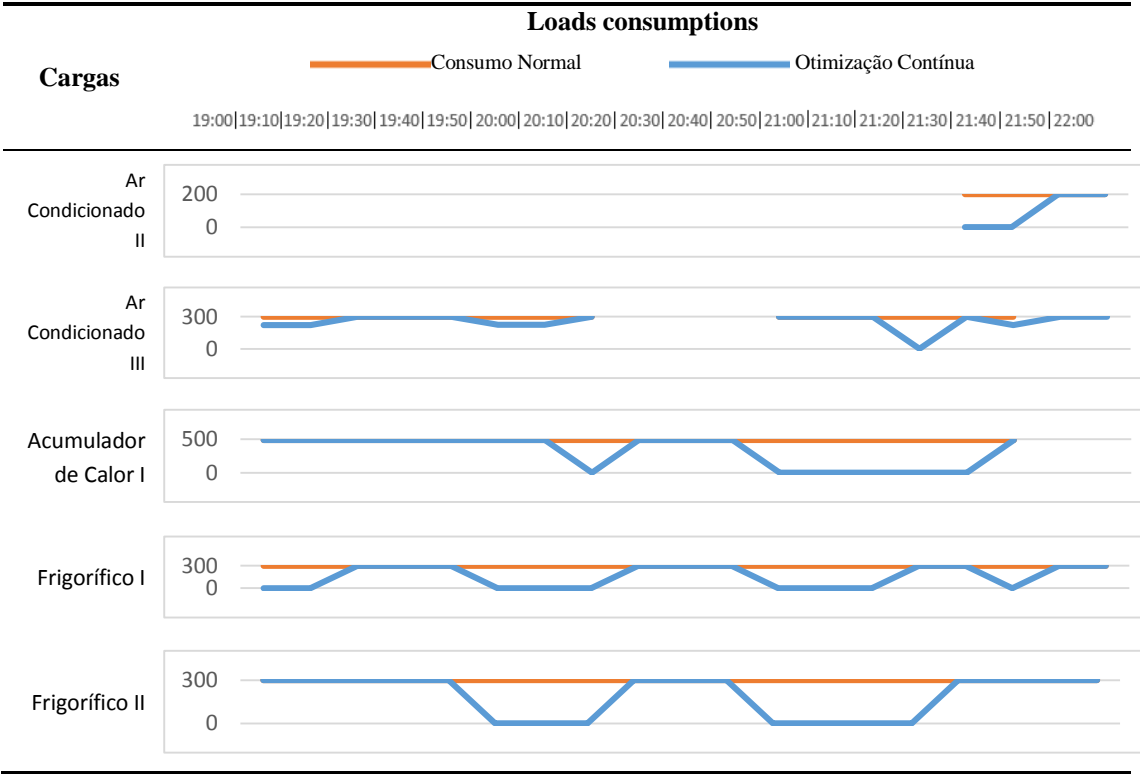


Figura 39 – Otimização por *Offset* vs. Otimização Contínua

A Tabela 12 contém algumas cargas usadas neste caso de estudo. A tabela demonstra o uso dessas cargas no seu consumo normal, sem otimização, e o que ocorreu durante a aplicação da Otimização Contínua. No caso dos frigoríficos, é visível a execução do algoritmo de otimização, procedendo ao desligar e ligar das cargas sempre que necessário ou possível.

Tabela 12 – Descriminação de cargas durante a Otimização Contínua



5 Conclusões

Neste capítulo vão ser abordadas as principais conclusões tiradas do trabalho realizado. Serão ainda sistematizados os objetivos cumpridos e as limitações conhecidas do sistema implementado. Por último, propõem-se diversas as funcionalidades e capacidades a serem integradas no futuro de modo a contribuir para a evolução do sistema.

5.1 Limitações e Trabalho Futuro

Os sistemas desenvolvidos no âmbito desta dissertação apresentam algumas limitações. Por exemplo, a integração de novos programas de *demand response* obrigam a efetuar implementações menores de programação, para que os agentes possam lidar com a nova informação. O código dos agentes encontra-se estruturado de forma a facilitar a introdução de interpretação de mensagens. Contudo, a alteração manual do código é sempre necessária neste estado. No futuro poder-se-ão adotar *scripts* externos de forma a permitir a integração de ações e reações nos agentes sem a necessidade de alterar o código interno.

O uso de redes neuronais artificiais vem trazer uma limitação ao trabalho. O treino das redes requer uma quantidade extensiva de dados para que estas produzam resultados viáveis. Porém, no trabalho realizado apenas existiam dados para as estações de verão e inverno, como tal, não é possível formar otimizações viáveis para a primavera e o outono. As redes neuronais artificiais funcionam e produzem valores, mas estes valores poderão não ser os mais apropriados. A resolução desta limitação passa apenas por reunir dados suficientes de forma a treinar as redes neuronais artificiais para a totalidade do ano.

O sistema móvel implementado possui a limitação de só se encontrar implementado para o sistema operativo *Android*. Outra limitação deste sistema é o facto de estar otimizado para ser executado em *tablets* de 10,1 polegadas. No entanto, estas limitações são de fácil resolução, pois o agente instalação suporta as comunicações independentemente da origem destas, como tal, a implementação em diversos sistemas operativos móveis é uma possibilidade exequível.

O trabalho futuro passa pela integração do sistema multiagente apresentado (MASGrIP) com o sistema MASCEM. Esta integração entre os dois sistemas multiagentes vai permitir a composição de um simulador capaz de produzir análises a vários níveis da rede de distribuição da energia elétrica, desde os mercados de energia existentes no MASCEM, até aos programas de *demand response* e consumidores finais existentes no MASGrIP.

No que diz respeito à evolução deste trabalho, novas técnicas de inteligência artificial podem ser aplicadas para estudar os seus desempenhos nas instalações dos pequenos e médios consumidores. Técnicas semelhantes podem ainda ser integradas nos *players* da *Smart Grid* de maneira a produzir resultados mais aliciantes nos programas de *demand response*.

Esta dissertação veio abrir caminho para o estudo da integração de pequenos e médios consumidores em ambientes de *Smart Grid*. A existência do GAIC possibilita a execução de testes e simulações de forma a validar e testar metodologias de integração e reação dos pequenos e médios consumidores.

5.2 Apreciação Final

No seu global, todos os objetivos do trabalho foram cumpridos com sucesso. No decorrer da dissertação houve a necessidade de ponderar, e por vezes alterar, as opções tomadas relativas à implementação dos sistemas. Porém, o resultado obtido encontra-se ao nível das expectativas iniciais.

O sistema multiagente implementado encontra-se a funcionar segundo os requisitos previamente estabelecidos. Cada agente possui as suas funcionalidades e objetivos individuais. A comunicação entre agentes encontra-se desenvolvida de modo a possibilitar mensagens síncronas e assíncronas no sistema. A inteligência de cada agente contribui para a simulação realista de troca de mensagens dentro de uma *Smart Grid*.

O agente instalação resultante superou os requisitos iniciais previstos para o trabalho. Este agente, para além do controlar cargas reais, possui sistemas de simulação de cargas virtuais e contextuais, permitindo, deste modo, alcançar um realismo superior ao inicialmente pretendido. O agente instalação tem ainda a possibilidade de funcionar fora do sistema multiagente, permitindo funcionar como um sistema de gestão de cargas independente. O desenvolvimento do dispositivo de controlo com comunicação ZigBee, embora não planeado, veio contribuir para a composição do agente instalação.

O sistema móvel foi desenvolvido com sucesso, tendo o dinamismo e funcionalidades previamente estipuladas para o trabalho. Este sistema encontra-se apenas desenvolvido para *Android*.

A inteligência das otimizações foi conseguida, tal como estava estipulado inicialmente. Prova deste facto é a capacidade de o sistema conseguir aprender com o utilizador sem obrigar a

alterações de configuração. Por estes motivos, o autor da dissertação considera que todos os objetivos inicialmente propostos foram alcançados com sucesso.

A conclusão desta dissertação culminou assim no sistema GAIC. Este sistema possui as funcionalidades de simulação da integração de pequenos e médios consumidores nas *Smart Grids*, a execução de programas de *demand response*, a resposta/reação dos pequenos e médios consumidores aos eventos da *Smart Grid* e ainda possui mecanismos que possibilitam dotar os pequenos e médios consumidores de metodologias de aprendizagem.

O trabalho descrito neste documento foi desenvolvido de modo a fornecer novos meios para a simulação de testes de impacto no pequeno e médio consumidor das *Smart Grids*. O sistema GAIC permite de uma forma simples e eficiente a simulação de ambientes *Smart Grid*. Permitindo a introdução de novos eventos na rede, este sistema torna-se uma vantagem para o estudo, testes e prova prática de aplicações de novos programas de *demand response*.

A integração de cargas reais no agente instalação transporta o sistema do mundo virtual para o mundo real, permitindo testes de impacto recorrendo a cargas e cenários reais. Todo este conjunto é uma vantagem para este trabalho, permitindo ao GECAD, instituição de acolhimento, a continuação de análises de impacto.

Os casos de estudo efetuados ao GAIC permitiram viabilizar o sistema e comprovar o sucesso da sua implementação. Os resultados científicos retirados nesta dissertação encontram-se publicados de forma a contribuir cientificamente para a futura integração dos pequenos e médios consumidores nos ambientes de *Smart Grid*.

Além do contributo prestado pela publicação de conteúdos científicos sobre a forma de artigos, a dissertação contribuiu ainda para os seguintes projetos de investigação:

- *CITOPSY* – Cyber-Ambient Intelligent Training of Operators in Power Systems Control Centres, projeto financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia com a referência PTDC/EEA-EEL/099575/2008;
- *ELECON* – Electricity Consumption Analysis to Promote Energy Efficiency Considering Demand Response and Non-technical Losses, projeto entre a Europa e o Brasil;
- *IMaDER* – *Intelligent Short Term Management of Distributed Energy Resources in a Multi-Player Competitive Environment* (PTDC/SEN-ENR/122174/2010), (FCOMP-01-0124-FEDER-021489).

Referências

- [Aalamifar, 2012] Aalamifar, F.; Hassanein, H.S.; Takahara, G., "Viability of powerline communication for the smart grid," Communications (QBSC), 2012 26th Biennial Symposium, pp.19,23, 28-29 Maio 2012.
- [Ahmed, 2013] Ahmed, S.F.; Desa, H.; Azim, F.; Surti, A.; Hussain, W., "Remote access of SCADA with online video streaming," Computer Science & Education (ICCSE), 2013 8th International Conference, pp.270,274, 26-28 Abril 2013.
- [Allcott, 2009] Allcott, H., Real Time Pricing and Electricity Markets, Working Paper. Cambridge, MA: Harvard Univ., 2009.
- [Babu, 2008a] Babu, C. A.; Ashok, S., "Peak Load Management in Electrolytic Process Industries," IEEE Transactions on Power Systems, vol.23, no.2, pp.399,405, Maio 2008.
- [Babu, 2008b] Babu, P.R.; Divya, V.P.S.; Venkatesh, K.; Kodad, S. F.; Ram, B.V.S., "Application of ANN and DSM techniques for peak load management a case study," Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, 2008. SIBIRCON 2008. IEEE Region 8 International Conference, pp.169,174, 21-25 Julho 2008.
- [Balaji, 2010] Balaji, P. G.; Srinivasan, D., "Multi-Agent System in Urban Traffic Signal Control," Computational Intelligence Magazine, IEEE , vol.5, no.4, pp.43,51, Novembro 2010.
- [Barbato, 2012] Barbato, A.; Carpentieri, G., "Model and algorithms for the real time management of residential electricity demand," Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International, pp.701,706, 9-12 Setembro 2012.
- [Bhurtun, 2011] Bhurtun, C.; Jahmeerbacus, I.; Jeewoath, C., "Short term load forecasting in Mauritius using Neural Network," Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 2011 Proceedings of the 8th Conference, pp.184,191, 16-17 Agosto 2011.
- [Bobbio, 2009] Bobbio, A.; Ciancamerla, E.; Di Blasi, S.; Iacomini, A.; Mari, F.; Melatti, I.; Minichino, M.; Scarlatti, A.; Tronci, E.; Terruggia, R.; Zendri, E., "Risk analysis via heterogeneous models of SCADA interconnecting Power Grids and Telco networks," Risks and Security of Internet and Systems (CRiSIS), 2009 Fourth International Conference, pp.90,97, 19-22 Outubro 2009.
- [Brandstatt, 2012] Brandstatt, C.; Friedrichsen, N.; Meyer, R.; Palovic, M., "Roles and responsibilities in smart grids: A country comparison," European Energy Market (EEM), 2012 9th International Conference, pp.1,8, 10-12 Maio 2012.
- [Byres, 2004] Byres, E. J., "The Use of Attack Trees in Assessing Vulnerabilities in SCADA Systems," International Infrastructure Survivability Workshop (IISW 2004), 2004.

- [Calabrese, 2007] Calabrese, M.; Di Lecce, V.; Piuri, V., "ANN Residential Load Classifier for Intelligent DSM System," Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 2007. CIMSIA 2007 IEEE International Conference, pp.33,38, 27-29 Junho 2007.
- [Chen, 2010] Chen, C-S.; Ku, T-T.; Lin, C-H., "Design of PLC-Based Identifier to Support Transformer Load Management in Taipower," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.46, no.3, pp.1072,1077, Maio-Junho 2010.
- [Chen, 2012] Chen, J-L.; Huang, C.; Zeng, Z-X.; Qu, S.; Luo, J.; Qin, Q., "Smart grid oriented smart substation characteristics analysis," Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE, pp.1,4, 21-24 Maio 2012.
- [Clastres, 2011] Clastres, C. "Smart grids: Another step towards competition, energy security and climate change objectives", Energy Policy 39 (9) 2011.
- [Dharme, 2006] Dharme, A.; Ghatol, A., "Demand Side Management Quality Index for Assessment of DSM Programs" IEEE PSCE 2006, pp. 1718-1721, 2006.
- [Fang, 2012] Fang, X.; Misra, S.; Xue, G.; Yang, D., "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," Communications Surveys & Tutorials, IEEE , vol.14, no.4, pp.944,980, Fourth Quarter 2012.
- [Farhangi, 2010] Farhangi, H., "The path of the smart grid," Power and Energy Magazine, IEEE , vol.8, no.1, pp.18,28, Janeiro-Fevereiro 2010.
- [Faria, 2013a] Faria, P.; Soares, J.; Vale, Z.; Morais, H.; Sousa, T., "Modified Particle Swarm Optimization Applied to Integrated Demand Response and DG Resources Scheduling," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 1, pp. 606-616, Special Section on Computational Intelligence Applications in Smart Grid, Março 2013.
- [Faria, 2013b] Faria, P.; Vale, Z., "Demand Response Programs Definition Using Demand Price Elasticity to Define Consumers Aggregation for an Improved Remuneration Structure," 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (2013 ISGT EU), Copenhagen, Dinamarca, 06-09 Outubro 2013.
- [Faria, 2014] Faria, P.; Vale, Z., "Decision Support Concerning Demand Response Programs Design and Use – A Conceptual Framework and Simulation Tool," Applied Mathematics & Information Sciences, vol. 8, no. 1, pp. 161-169, Janeiro 2014.
- [Faruqui, 2002] Faruqui; Hughes, J.; Mauldin, M., "Real-time pricing in California: R&D issues and needs," California Energy Commission, Prepared for Laurie A. Ten Hope PIER Program Lead: Strategic, Janeiro 8, 2002.
- [Fernandes, 2011] Fernandes, F.; Sousa, T.; Silva, M.; Morais, H.; Vale, Z.; Faria, P., "Genetic Algorithm Methodology applied to Intelligent House Control," presented at the Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG) at the IEEE SSCI 2011 (IEEE Symposium Series on Computational Intelligence), Paris, France, 2011.

- [Gomes, 2011] Gomes, L.; Fernandes, F.; Sousa, T.; Silva, M.; Morais, H.; Vale, Z.; Ramos, C., "Contextual intelligent load management with ANN adaptive learning module", International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems - ISAP 2011, Hersonissos, Crete, Greece, 25-28 Setembro, 2011.
- [Gomes, 2013] Gomes, L.; Fernandes, F.; Faria, P.; Vale, Z.; Ramos, C.; Morais, H. "Contextual Intelligent Load Management Considering Real-Time Pricing in a Smart Grid Environment," 17th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP2013), Tóquio, Japão, Julho 01-04, 2013.
- [Gomes, 2014] Gomes, L.; Faria, P.; Morais, H.; Vale, Z.; Ramos, C., "Distributed Agent-based Intelligent System for Demand Response Program Simulation in the Scope of Smart Grids," IEEE Intelligent Systems, Digital Object Identifier : 10.1109/MIS.2013.2.
- [Guo, 2008] Guo, Y.; Li, R.; Poulton, G.; Zeman, A., "A Simulator for Self-Adaptive Energy Demand Management," Self-Adaptive and Self-Organizing Systems, 2008. SASO '08. Second IEEE International Conference, pp.64,73, 20-24 Outubro 2008.
- [Guozhen, 2009] Guozhen, H.; Tao, C.; Changsong, C.; Shanxu, D., "Solutions for SCADA system communication reliability in photovoltaic power plants," Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, pp.2482,2485, 17-20 Maio 2009.
- [Gupta, 2012] Gupta, C.; Singh, S., "Energy management scheme for irrigation pump load," Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2012 International Conference, pp.779,782, 3-5 Julho 2012.
- [Hamilton, 2010] Hamilton, K.; Gulhar, N., "Taking demand response to the next level," IEEE Power Energy Mag., vol. 8, no. 3, pp. 60–65, Maio 2010.
- [Hernandez, 2013] Hernandez, L.; Baladron, C.; Aguiar, J.M.; Carro, B.; Sanchez-Esguevillas, A.; Lloret, J.; Chinarro, D.; Gomez-Sanz, J.J.; Cook, D., "A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants," Communications Magazine, IEEE, vol.51, no.1, pp.106,113, Janeiro 2013.
- [IEEE, 2008] IEEE Std C37.ITM-2007, "IEEE Standard for SCADA and Automation Systems" IEEE Power and Energy Society, IEEE, USA, pp. 19-21, 2008.
- [International Energy Agency, 2011] International Energy Agency, Technology Roadmap: Smart Grids, Paris: IEA, 2011.
- [Kang, 2009] Kang, D-J.; Lee J-J.; Kim, S-J.; Park, J-H., "Analysis on cyber threats to SCADA systems," Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, 2009, pp.1,4, 26-30 Outubro 2009.
- [Kardam, 2013] Kardam, N.; Ansari, M.A.; Farheen, F., "Communication and load balancing using SCADA model based integrated substation," Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference, pp.1256,1261, 10-12 Abril 2013.

- [Khamphanchai, 2011] Khamphanchai, W.; Pisanupoj, S.; Ongsakul, W.; Pipattanasomporn, M., "A multi-agent based power system restoration approach in distributed smart grid," Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE), 2011 International Conference, pp.1,7, 28-30 Setembro 2011.
- [Kouluri, 2011] Kouluri, M.K.; Pandey, R.K., "Intelligent agent based micro grid control," Intelligent Agent and Multi-Agent Systems (IAMA), 2011 2nd International Conference, pp.62,66, 7-9Setembro 2011.
- [Kumar, 2010] Kumar, R.K.R.; Dewal, M. L.; Saini, K., "Utility of SCADA in power generation and distribution system," Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference, vol.6, pp.648,652, 9-11 Julho 2010.
- [Law, 2012] Law, Y. W.; Alpcan, T.; Lee, V.C.S.; Lo, A.; Marusic, S.; Palaniswami, M., "Demand Response Architectures and Load Management Algorithms for Energy-Efficient Power Grids: A Survey," Knowledge, Information and Creativity Support Systems (KICSS), 2012 Seventh International Conference, pp.134,141, 8-10 Novembro 2012.
- [Li, 2003] Li, W.; Shaaban, M.; Yan, Z.; Ni, Y.; Xu, F., "Available transfer capability calculation with static security constraints," in Proc. IEEE PES Gen. Meet. 2003, vol. 1, pp. 306–310, Julho 2003.
- [Lu, 2006] Lu, H-R.; Yao, L., "On-line Load Optimization for Two Way Load Management System," Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC '06. IEEE International Conference, vol.4, pp.3250,3255, 8-11Outubro 2006.
- [Madaeni, 2013] Madaeni, S.H.; Sioshansi, R., "Using Demand Response to Improve the Emission Benefits of Wind," IEEE Transactions on Power Systems, vol.28, no.2, pp.1385,1394, Maio 2013.
- [Manickavasagam, 2011] Manickavasagam, K.; Nithya, M.; Priya, K.; Shruthi, J.; Krishnan, S.; Misra, S.; Manikandan, S., "Control of distributed generator and smart grid using multi-agent system," Electrical Energy Systems (ICEES), 2011 1st International Conference, pp.212,217, 3-5 Janeiro 2011.
- [McAuliffe, 2004] McAuliffe, P.; Rosenfeld, A., "Response of residential customers to critical peak pricing and time-of-use rates during the summer of 2003," California Energy Commission, Tech. Rep., Setembro 2004.
- [Medina, 2010] Medina, J.; Mullerand, N.; Roytelman, I., "Demand response and distributed grid operations: Opportunities and challenges," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 193–198, Setembro 2010.
- [Mollah, 2012] Mollah, M.B.; Islam, S.S., "Towards IEEE 802.22 based SCADA system for future distributed system," Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2012 International Conference, pp.1075,1080, 18-19 Maio 2012.
- [Moshari, 2010] Moshari, A.; Yousefi, G.-R.; Ebrahimi, A.; Haghbin, S., "Demand-side behavior in the smart grid environment," Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES , pp.1,7, 11-13 Outubro 2010.

- [NAESB, 2008] NAESB, "Recommendation to NAESB Executive Committee: Review and Develop Business Practice Standards to Support DR and DSM-EE Programs", September 29, 2008.
- [Nagata, 2012a] Nagata, T.; Ueda, Y.; Utatani, M., "A multi-agent approach to smart grid energy management," IPEC, 2012 Conference on Power & Energy, pp.327,331, 12-14 Dezembro 2012.
- [Nagata, 2012b] Nagata, T.; Ueda, Y.; Utatani, M., "A multi-agent approach to Smart Grid operations," Power System Technology (POWERCON), 2012 IEEE International Conference, pp.1,5, Oct. 30 2012-Novembro 2 2012.
- [Nunna, 2012] Nunna, H.S.V.S.K.; Doolla, S., "Demand Response in Smart Distribution System With Multiple Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.3, no.4, pp.1641,1649, Dezembro 2012.
- [Oualmakran, 2012] Oualmakran, Y.; Melendez, J.; Herraiz, S., "Self-healing for smart grids: Problem formulation and considerations," Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition, pp.1,6, 14-17 Outubro 2012.
- [Oliveira, 2013] Oliveira, P.; Gomes, L.; Pinto, T.; Faria, P.; Vale, Z.; Morais, H., "Load Control Timescales Simulation in a Multi-Agent Smart Grid Platform," 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (2013 ISGT EU), Copenhagen, Dinamarca, 06-09 Outubro, 2013.
- [Ozcan, 2011] Ozcan, I.; Bora, S., "A hybrid load balancing model for multi-agent systems," Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 2011 International Symposium, pp.182,187, 15-18 Junho 2011.
- [Ozturk, 2013] Ozturk, Y.; Senthilkumar, D.; Kumar, S.; Lee, G., "An Intelligent Home Energy Management System to Improve Demand Response," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.4, no.2, pp.694,701, Junho 2013.
- [Panajotovic, 2011] Panajotovic, B.; Jankovic, M.; Odadzic, B., "ICT and smart grid," Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), 2011 10th International Conference, vol.1, pp.118,121, 5-8 Outubro 2011.
- [Pandiaraj, 2000] Pandiaraj, K.; Fox, B., "Novel voltage control for embedded generators in rural distribution networks," in Proc. Int. Conf. Power System Technology, vol. 1, pp. 457-462, 2000.
- [Parvania, 2010] Parvania, M.; Fotuhi-Firuzabad, M., "Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.1, no.1, pp.89-98, Junho 2010.
- [Pipattanasomporn, 2009] Pipattanasomporn, M.; Feroze, H.; Rahman, S., "Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation," Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES, pp.1,8, 15-18 Março 2009.
- [Praça, 2003] Praça, I.; Ramos, C.; Vale, Z.; Cordeiro, M., "MASCEM: A Multi-Agent System that Simulates Competitive Electricity Markets," IEEE Intelligent Systems, vol. 18, nº 6, pág. 54-60, Special Issue on Agents and Markets Novembro-Dezembro, 2003.

- [Queiroz, 2011] Queiroz, C.; Mahmood, A.; Tari, Z., "SCADASim—A Framework for Building SCADA Simulations," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.2, no.4, pp.589,597, Dezembro 2011.
- [Quintero, 2012] Quintero M, C.G.; Mares, J.R.J., "An analysis of Intelligent Demand Management criteria applied in a building case study," Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE), 2012 IEEE International Symposium, pp.1,6, 25-26 Outubro 2012.
- [Qureshi, 2011] Qureshi, J.A.; Gul, M.; Faruqi, M. A.; Qureshi, W.A., "Intelligent demand management for end user benefits," Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East), 2011 IEEE PES Conference, pp.1,7, 17-20 Dezembro 2011.
- [Rahimiand, 2010] Rahimiand, F.; Ipakchi, A., "Demand response samarket resource under the smart grid paradigm," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 2, pp. 82–88, Setembro 2010.
- [Rajeev, 2010] Rajeev Kumar, R.K.; Dewal, M. L.; Saini, K., "Utility of SCADA in power generation and distribution system," Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference, vol.6, pp.648,652, 9-11 Julho 2010.
- [Ramos, 2011] Ramos, S.; Morais, H.; Vale, Z.; Faria, P.; Soares, J., "Demand response programs definition supported by clustering and classification techniques," Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference, pp.1,6, 25-28 Setembro 2011.
- [Singhal, 2012] Singhal, A.; Saxena, R. P., "Software models for Smart Grid," Software Engineering for the Smart Grid (SE4SG), 2012 International Workshop, pp.42,45, 3-3 Junho 2012.
- [Sioshansi, 2010] Sioshansi, R., "Evaluating the impacts of real-time pricing on the cost and value of wind generation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 2, pp. 741–748, Maio 2010.
- [Slay, 2007] Slay, J.; Miller, M., "Lessons learned from the maroochy water breach," in Critical Infrastructure Protection, ser. IFIP International Federation for Information Processing, E. Goetz and S. Sheno, Eds. New York: Springer, vol. 253, pp. 73–82, 2007.
- [Stragier, 2010] Stragier, J.; Hauttekeete, L.; De Marez, L., "Introducing Smart grids in residential contexts: Consumers' perception of smart household appliances," Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010 IEEE Conference, pp.135,142, 27-29 Setembro 2010.
- [U.S. Department of Energy, 2006] U.S. Department of Energy, Benefit of Demand Response in Electricity Market and Recommendations for Achieving Them, Fevereiro 2006.
- [US Department of Energy, 2008] US Department of Energy, The Smart Grid: An Introduction, 2008.
- [Vale, 2011] Vale, Z.; Pinto, T.; Praca, I.; Morais, H., "MASCEM: Electricity Markets Simulation with Strategic Agents," IEEE Intelligent Systems, vol. 26, no. 2, pp.9-17, Março-Abril 2011.

- [Vale, 2013] Vale, Z.; Morais, H.; Faria, P.; Ramos, C., "Distribution System Operation Supported by Contextual Energy Resource Management Based on Intelligent SCADA," *Renewable Energy*, vol. 52, pp. 143-153, April 2013.
- [Vestervang, 2011] Vestervang, S.; Harder, B.; Borup Jensen, J.; Klüver, K.; Bjerre, T.; Gents J.; Hartvig Jacobsen, S., (eds.), "Energy 2011 - Annual report on Danish energy research programmes," published in cooperation between Energinet.dk, Danish Energy Agency/ EDDP secretariat, Danish Energy Association, Danish Agency for Science, Technology and Innovation/DCSR secretariat, European Commission Representation in Denmark and Danish National Advanced Technology Foundation, Junho 2011.
- [Wishart, 2011] Wishart, M.T.; Turner, J.; Perera, L.B.; Ghosh, A.; Ledwich, G., "A Novel Load Transfer Scheme for Peak Load Management in Rural Areas," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.26, no.2, pp.1203,1211, April 2011.
- [Xianyong, 2012] Xianyong, F.; Butler-Purpy, K.L.; Zourntos, T., "Multi-Agent System-Based Real-Time Load Management for All-Electric Ship Power Systems in DC Zone Level," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.27, no.4, pp.1719,1728, Novembro 2012.
- [Ye, 2013] Ye, Y.; Yi, Q.; Sharif, H.; Tipper, D., "A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges," *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE , vol.15, no.1, pp.5,20, First Quarter 2013.
- [Yee, 2012] Yee Wei Law; Alpcan, T.; Lee, V.C.S.; Lo, A.; Marusic, S.; Palaniswami, M., "Demand Response Architectures and Load Management Algorithms for Energy-Efficient Power Grids: A Survey," *Knowledge, Information and Creativity Support Systems (KICSS)*, 2012 Seventh International Conference on , vol., no., pp.134,141, 8-10 Nov. 2012.
- [Ying, 2012] Ying, L.; Boon, L. N.; Trayer, M.; Lingjia Liu, "Automated Residential Demand Response: Algorithmic Implications of Pricing Models," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.3, no.4, pp.1712,1721, Dec. 2012
- [Yinliang, 2011] Yinliang, X.; Wenxin, L.; Jun, G., "Stable Multi-Agent-Based Load Shedding Algorithm for Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.26, no.4, pp.2006,2014, Novembro 2011.
- [Yonghua, 2011] Yonghua, C., "Test platform of smart grids with renewable energy systems and plug-in hybrid electric vehicles," *Power Electronics and Applications (EPE 2011)*, Proceedings of the 2011-14th European Conference, pp.1,8, Agosto 30 2011-Setembro 1 2011.
- [Yoo, 2009] Yoo, H-J.; Seo, J-W.; Shin, M-C.; Suh, H-S., "Study of data acquisition and communication equipment for micro-grid system," *Consumer Electronics*, 2009. ISCE '09. IEEE 13th International Symposium, pp.671,675, 25-28 Maio 2009.
- [Zhong, 2013] Zhong, H.; Xie, L.; Xia, Q., "Coupon Incentive-Based Demand Response: Theory and Case Study," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.28, no.2, pp.1266,1276, Maio 2013.

Anexo A – XML de Configuração

```
<Data>
  <CSP>
    <AgentNameCSP>CSP1</AgentNameCSP>
  </CSP>
  <Confort>
    <Percentage>70</Percentage>
  </Confort>
  <ISO>
    <Reduction>
      <Percentage>15</Percentage>
    </Reduction>
  </ISO>
  <LastChange>18-05-2011 16:14:40</LastChange>
  <CordLat>21.611988</CordLat>
  <CordLong>2.789533</CordLong>
  <Type>LC</Type>
  <Power>67,60</Power>
  <Loads>
    <PLC_Protocol>ModBus</PLC_Protocol>
    <Division>
      <Name>Storage</Name>
      <Load>
        <IDType>5</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>-1</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Halogen Lamp</Description>
        <MaxPower>500</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
      </Load>
      <Load>
        <IDType>1</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>1</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>203*10</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>2</PLC_Memory_Range>
        <Type>Variable</Type>
        <Description>Air Conditioner</Description>
        <MaxPower>90</MaxPower>
        <MaxRange>1500</MaxRange>
```

```

        <DLC>True</DLC>
    </Load>
    <Load>
        <IDType>9</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>12</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Washing Machine</Description>
        <MaxPower>550</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
</Division>
<Division>
    <Name>Living Room</Name>
    <Load>
        <IDType>2</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>17</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Ceiling Light</Description>
        <MaxPower>300</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
    <Load>
        <IDType>6</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>7</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>126</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Heat Accumulator 1</Description>
        <MaxPower>40</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
    <Load>
        <IDType>11</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>13</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Television</Description>
        <MaxPower>138</MaxPower>

```

```

        <DLC>False</DLC>
    </Load>
</Division>
<Division>
    <Name>Kitchen</Name>
    <Load>
        <IDType>2</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>4</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>106</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>5</PLC_Memory_Range>
        <Type>Variable</Type>
        <Description>Fluorescent Lamp</Description>
        <MaxPower>70</MaxPower>
        <MaxRange>100</MaxRange>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
    <Load>
        <IDType>8</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>11</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Refrigerator</Description>
        <MaxPower>300</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
    <Load>
        <IDType>12</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>15</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Microwave</Description>
        <MaxPower>550</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
    <Load>
        <IDType>10</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>18</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Dishwasher</Description>

```

```

        <MaxPower>550</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
</Division>
<Division>
    <Name>Bathroom</Name>
    <Load>
        <IDType>3</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>5</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>107</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Incandescent Lamp</Description>
        <MaxPower>30</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
</Division>
<Division>
    <Name>Room</Name>
    <Load>
        <IDType>4</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>6</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>108</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Compact Lamp</Description>
        <MaxPower>30</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
    <Load>
        <IDType>6</IDType>
        <PLC_Memory_OnOff>8</PLC_Memory_OnOff>
        <PLC_Memory_Power>-1</PLC_Memory_Power>
        <PLC_Memory_Range>-1</PLC_Memory_Range>
        <Type>Discrete</Type>
        <Description>Heat Accumulator 2</Description>
        <MaxPower>120</MaxPower>
        <DLC>False</DLC>
    </Load>
</Division>
</Loads>
</Data>

```

Anexo B – Lista de Componentes

<i>Componentes</i>	<i>Quantidade</i>
XBee	1
Sensor de corrente	1
Atmega	1
4N35	1
LM7805	1
LM1117	1
Transformador MYRRA	1
Ponte Retificadora	1
Condensador 10 μ F	4
Condensador 0,1 μ F	2
Condensador 0,33 μ F	1
Condensador 1nF	1
Resistência 10k Ω	3
Resistência 45k Ω	2
Resistência 330 Ω	3
Resistência 1,7k Ω	1
MOC 3021M	1
BT138-H	1
Dissipador	1
Conectores	2
Caixa IP65	1
Conector de tomada	1